UNIVERSITÉ DE LAUSANNE – FACULTÉ DES SCIENCES

Le lac de Joux

Etude hydrologique du bassin

Recherches de mai 1953 à avril 1957

RÉSUMÉ DE LA THÈSE

présentée
à la Faculté des Sciences de l'Université de Lausanne
pour l'obtention du grade de docteur ès sciences

par

ERIC BOSSET

porteur du diplôme d'études de police scientifique de
l'Université de Lausanne et du diplôme fédéral de chimiste
pour l'analyse des denrées alimentaires

Imprimerie Birkhäuser S.A., Bâle
1962

1961

UNIVERSITÉ DE LAUSANNE – FACULTÉ DES SCIENCES

Le lac de Joux

Etude hydrologique du bassin

Recherches de mai 1953 à avril 1957

RÉSUMÉ DE LA THÈSE

présentée
à la Faculté des Sciences de l'Université de Lausanne
pour l'obtention du grade de docteur ès sciences

par

ERIC BOSSET

porteur du diplôme d'études de police scientifique de
l'Université de Lausanne et du diplôme fédéral de chimiste
pour l'analyse des denrées alimentaires

Imprimerie Birkhäuser S.A., Bâle
1962

UNIVERSITÉ DE LAUSANNE

FACULTÉ DES SCIENCES

Vu le rapport présenté par le jury d'examen, composé de MM. les Professeurs F. COSANDEY, directeur de thèse, O. JAAG, de l'E.P.F., J. DE BEAUMONT, doyen et de M. P. MERCIER, physicien, le Conseil de Faculté autorise l'impression de la thèse*) de

Monsieur ERIC BOSSET

intitulée:

«Le lac de Joux. – Etude hydrologique du bassin.»

Lausanne, le 12 mai 1961.

Le doyen de la Faculté des Sciences:

J. DE BEAUMONT

R. UNIV.
BIBLIOTHEEK
LEIDEN

*) Ce tiré à part est un résumé de la thèse présentée dont le texte complet dactylographié peut être consulté à la Bibliothèque Cantonale et Universitaire de Lausanne.

Tiré à part de la Revue suisse d'Hydrologie, tome XXIV, fasc. 1 (1962)

Sonderabdruck aus
SCHWEIZERISCHE ZEITSCHRIFT FÜR HYDROLOGIE
BIRKHÄUSER VERLAG BASEL
Vol. XXIV 1962 Fasc. 1

Le lac de Joux

Etude hydrologique du bassin

Par

E. BOSSET

Lausanne

Le lac de Joux

Etude hydrologique du bassin

Recherches de mai 1953 à avril 1957[1])

Par E. Bosset, Lausanne

Manuscrit reçu le 23 novembre 1961

TABLE DES MATIÈRES

Introduction 91

PREMIÈRE PARTIE
Etude générale du bassin

I. Orographie, morphologie et hydrographie de la vallée de Joux 91
II. Conditions climatiques et météorologiques de la Vallée. Mouvement des eaux des lacs 94
III. Ravitaillement en eau potable de la Vallée. Evacuation des eaux usées . . . 97

DEUXIÈME PARTIE
Etude hydrobiologique du lac de Joux

IV. Programme des recherches 99
V. Température et transparence des eaux 103
VI. Caractéristiques physico-chimiques des eaux 107
VII. Qualités bactériologiques des eaux 121
VIII. Composition et évolution du plancton pélagique. Pêches littorales de plancton 127
IX. Caractères chimiques et biologiques des sédiments 139
X. Végétation littorale aquatique 144
XI. Considérations générales sur la pollution du lac de Joux 144

Conclusions 149

Bibliographie 149

[1]) Cette publication est un résumé de la thèse présentée en mai 1961 à la Faculté des Sciences de l'Université de Lausanne. Le texte intégral, avec les planches et annexes, peut être consulté à la Bibliothèque cantonale et universitaire de Lausanne.

INTRODUCTION

Comparativement à d'autres bassins, les lacs de la vallée de Joux n'ont guère attiré l'attention des chercheurs, sans doute à cause de leur isolement. Hormis quelques observations physiques et biologiques à la fin du siècle dernier, ils n'ont jusqu'à présent jamais fait l'objet d'études thermiques, chimiques et bactériologiques.

Autre consta ation: la consommation d'eau des collectivités humaines et son augmentation constante posent à tous les échelons le grave problème de l'approvisionnement. Si dans l'état actuel, l'alimentation en eau potable des diverses agglomérations de la Vallée peut être considérée comme satisfaisante, quantitativement tout au moins, ce problème n'est cependant pas définitivement résolu. Etant donné le phénomène général d'usure des sources, il n'est pas exclu qu'un jour, d'ici dix ou vingt ans, ou même plus tard, distributeurs et autorités – en dépit des efforts accomplis pour mettre en valeur les ressources en eau souterraine – soient dans l'obligation de mettre à contribution le principal bassin, le lac de Joux, pour parfaire cette alimentation.

Ces motifs nous ont incité à entreprendre une étude approfondie de ce lac, axant nos recherches principalement sur les phénomènes de pollution et d'auto-épuration, et sur l'utilisation du lac comme réservoir d'eau potable. Parallèlement, nous avons abordé une étude générale du bassin d'alimentation, notamment du point de vue morphologie, hydrographie, climatologie, météorologie, etc., et cherché à définir l'état actuel de l'alimentation en eau potable de la Vallée.

De ce travail, nous nous bornerons à présenter les *principaux résultats* relatifs au lac de Joux, après avoir esquissé les caractéristiques essentielles du bassin d'alimentation.

PREMIÈRE PARTIE

ÉTUDE GÉNÉRALE DU BASSIN

I. Orographie, morphologie et hydrographie de la vallée de Joux

Située dans la partie Sud du Jura suisse, la vallée de Joux – désignée le plus souvent par l'appellation: *La Vallée* – se révèle comme un petit monde à part. En forme de bassin fermé, limitée par les chaînes du *Mont-Tendre* et du *Risoux*, le verrou *Dent de Vaulion - Mont d'Orzeires*, et le *plateau des Rousses*, elle constitue une unité géographique bien déterminée (fig. 1)

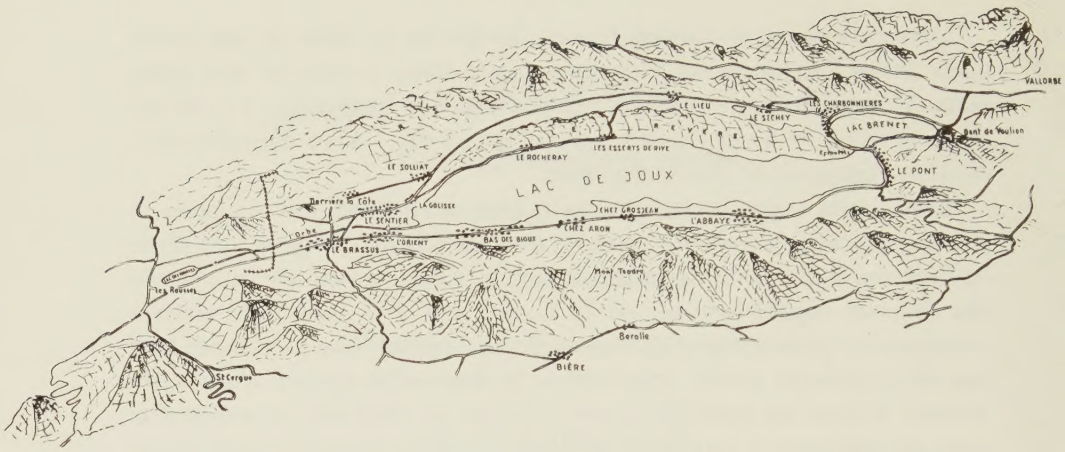


Figure 1
Carte schématique de la Vallée.

Elle s'étend du S.-W. au N.-E. sur environ 30 km, dont 22 km sur territoire suisse. La largeur mesurée par l'écartement de la ligne de faîte des chaînes anticlinales du Mont-Tendre et du Risoux est de 9 km. La largeur moyenne du thalweg est d'environ 1 km, celle maximum atteignant 1,5 km.

L'une des particularités les plus remarquables de la Vallée est le parallélisme presque parfait de ses éléments topographiques. Cependant, toute régularité cesse à l'extrémité septentrionale du lac de Joux, où un accident tectonique très important – la dislocation de la Dent de Vaulion – barre la Vallée à l'est, dans toute sa largeur.

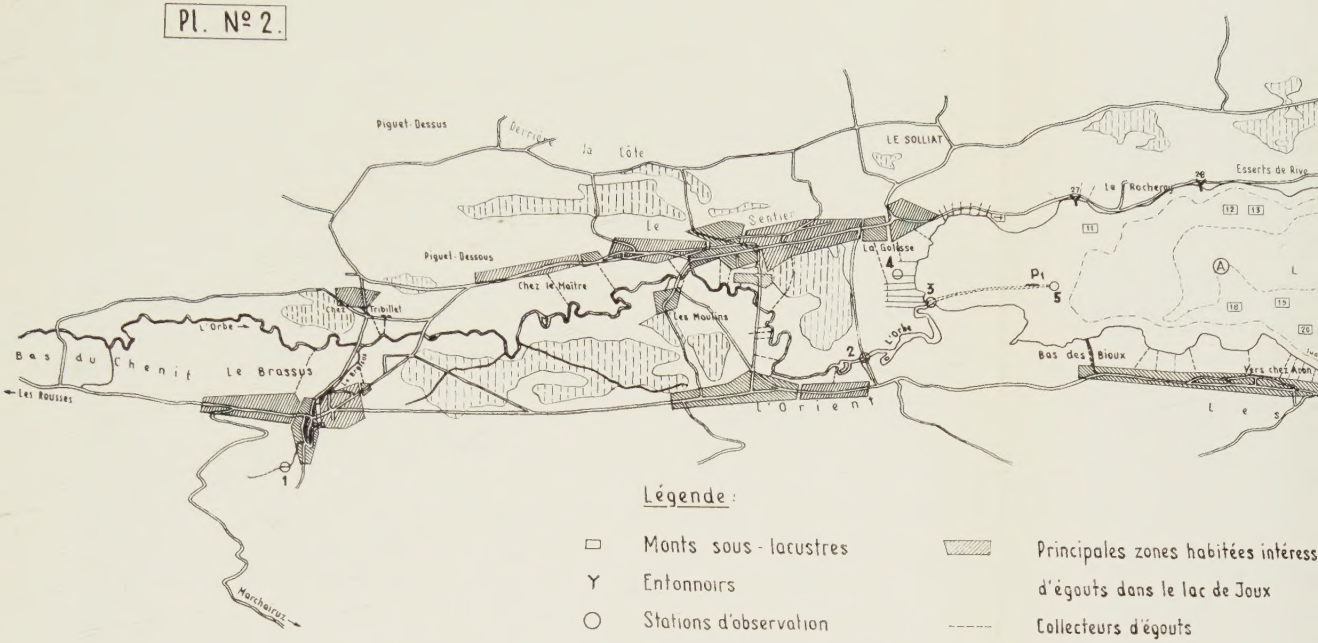
Un autre trait frappant, c'est le *caractère fermé* de ce territoire. Prise dans son ensemble, la vallée de Joux constitue un important bassin naturel fermé, c'est-à-dire une cuvette sans écoulement superficiel, mais en relation avec un réseau hydrographique souterrain. C'est le plus grand du Jura suisse, avec une superficie totale de 211 km², dont 170,42 km² sur territoire suisse. Il possède lui-même 44 cuvettes fermées, dont la plus étendue est celle du lac de Joux (34 km²).

Une *morphologie de type karstique* y prédomine sous la forme de fissures, d'entonnoirs et autres pertes, etc. Le sol de la Vallée, formé essentiellement par les calcaires du Jurassique supérieur et du Crétacé, est en effet extrêmement poreux, très fissuré ou crevassé.

Les eaux météoriques que recueille ce réservoir naturel s'échappent en totalité par infiltration dans le sol, leur disparition étant plus ou moins ra-

CARTE DES LACS

Pl. Nº 2.



LÉGENDE DE LA CARTE DES LACS DE JOUX

1 Source du Brassus
2 L'Orbe, pont des Crêtets
3 Embouchure de l'Orbe
4 Canaux de la Tête du lac
5 Fil de l'Orbe
6 Source de la Lionne
7 La Lionne, pont vers fabrique de limes
8 Prise d'eau et galerie des Epinettes
9 Ancien canal Joux-Brene
10 Prise d'eau de la Tornaz

Monts sous-lacustres:

11 Mont de la Baine
12–13 Monts des Esserts de
14 Mont de Pré Lionnet
15 Mont de la Roche Fendu
16 Mont de la Capite
17 Mont des Ecuelles
18 Mont des Herbes
19 Grand Mont
20 Mont Mousse
21–22 Petits Monts
23 Mont Chez la Musique

les déversements

25000

Niveaux des eaux :

Cote des hautes eaux	1004.80 (tolérance 1005.00)
Cote moyenne	1003.80
Cote admissible pour basses eaux	1001.50

24 Mont de Groinroux
25 Mont Rond
26 Mont de l'Abbaye

Entonnoirs du lac de Joux:

27 Entonnoir du Moulin
28 Entonnoir du Rocheray
29 Entonnoir de Pré Lionnet
30 Entonnoir de la Roche Fendue

Entonnoirs du lac Brenet:

31 Entonnoir des Crettets
32 Entonnoir Neuf
33 Entonnoir Martinet
34 Entonnoir de Bon Port

35 Creux aux Italiens
36 Cave à la Metsire

Stations d'observation:

Joux:

profil
longitudinal: A, *B*, D, *E*, *F*, *J*, L, *M*
rive N.-W.: R.F., H
rive S.-E.: C, G, K

Brenet: Br.

Stations de référence:

2 ou O.C. L'Orbe, pont des Crêtets
3 ou F.O. Fil de l'Orbe

7 ou Ly. La Lionne, pont vers fabrique de limes

Pêches littorales de plancton:

P_1 Fil de l'Orbe
P_2 Bégroy
P_3 Groinroux
P_4 Les Rochettes
P_5 Prés des Rives

Courbes isohypses:
(selon carte nationale 1957)

-.-.-.-.-. 1000
– – – – – 990
-.....-..... 980

pide selon la nature du terrain. L'écoulement souterrain de ces eaux contribue à alimenter la *source vauclusienne de l'Orbe*, près Vallorbe (chap. II).

Le *réseau hydrographique superficiel* présente les caractéristiques suivantes. Le thalweg, ou dépression synclinale de Joux, est occupé dans toute sa largeur et sur une longueur de 9 km par le *lac de Joux* (1004 m), puis en amont par une grande étendue de prairies et de tourbières où serpente l'Orbe, enfin sur territoire français par le *lac des Rousses*. A l'extrémité N.-E. du vallon latéral, ou synclinal du Solliat, séparé de la cuvette principale par l'étroit chaînon rocheux du *Revers*, se trouve le *lac Brenet*, qui jusqu'au début du siècle communiquait librement avec le lac de Joux. Dans cette dépression peu profonde, dont la largeur varie de 400 m à 1 km, se trouve également le petit *lac Ter*, entre Le Lieu et Le Séchey, sans relation avec les précédents.

Sur le versant S.-E. de la Vallée, les cours d'eau sont peu nombreux, de débit très variable; sur le versant N.-W., ils font presque entièrement défaut. Il en est de même pour les sources (chap. III).

Les principaux affluents du lac de Joux sont l'*Orbe*, qui prend naissance dans le lac des Rousses et reçoit, rive droite, une série de ruisseaux, dont le *Biblanc*, près de la frontière, et le *Brassus*, alimenté par la source vauclusienne du même nom; la *Lionne*, issue d'une source vauclusienne 300 m au S.-E. du village de L'Abbaye (fig. 2).

Signalons encore qu'à l'extrémité S.-W. du lac, dénommée souvent *tête du lac*, une part importante des eaux de la zone marécageuse située entre La Golisse et l'Orbe se déverse directement dans le lac, par l'intermédiaire de plusieurs fossés de drainage (fig. 2).

Les principales dimensions des lacs de Joux et Brenet sont les suivantes:

		Lac de Joux	*Lac Brenet*
Longueur	km	9,0	1,8
Largeur maximum	m	1200	500
Périmètre	km	20	4
Superficie	km^2	8,67	0,86
Profondeur maximum	m	33,5 [1])	17,5 [2])
Volume des eaux	mio m^3	160	5

L'extrémité méridionale du lac de Joux est occupée, dans toute sa largeur, par une vaste beine (terrasse littorale submergée profonde de quelques mètres) qu'entaille le *Fil de l'Orbe*, sorte de chenal sous-lacustre par lequel

[1]) Par rapport à la cote maximum 1005,00 m (cote moyenne du niveau d'eau: 1003,80 m).
[2]) Par rapport à la cote 1001,80 m.

l'Orbe pénètre dans le lac (fig. 2). A l'extrémité aval se trouve une beine peu étendue. La rive orientale est munie sur toute sa longueur d'une beine assez large. Enfin, le bord occidental présente dans sa moitié septentrionale un talus rocheux abrupt. Sur cette rive sont situés une série d'*entonnoirs*, excavations rocheuses verticales que l'on retrouve sur la rive N.-W. du lac Brenet, tous au même niveau, à l'exception des entonnoirs des Crettets.

Le relief immergé du lac de Joux présente une particularité fort curieuse, à savoir l'existence de 16 îlots sous-lacustres, les «*monts*», situés à des profondeurs variables, qui d'une manière plus ou moins nette, divisent le fond en une série de dépressions ou «fosses» dont la principale est la cuvette centrale profonde de 31–33 m.

Les lacs de Joux et Brenet sont des *lacs de colmatage glaciaire*; ils ont pris naissance après le retrait du glacier local. En dépit des mesures prises par la Compagnie vaudoise d'électricité (endiguement des entonnoirs et maintien du lac Brenet à un niveau minimum, afin d'éviter des pertes par les entonnoirs des Crettets), leur cuvette laisse échapper une quantité d'eau importante, par une série d'orifices invisibles dont l'existence ressort de nombreuses observations dues notamment à FOREL.

Tributaire du lac de Joux par une galerie creusée sous la crête rocheuse des Epinettes et par un canal de décharge, le lac Brenet a pour émissaire la galerie de dérivation de La Tornaz, construite au début du siècle, qui emmène l'eau à l'usine de La Dernier, près Vallorbe. Exploités pour la production d'énergie électrique, sous forme d'une *retenue différentielle* (Joux entre les cotes 1005,00 et 1001,50 m, Brenet à la cote 1001,70 $\pm$ 0,10 m), ces lacs sont caractérisés par un renouvellement irrégulier des eaux, plus ou moins considérable suivant l'importance du débit réservé et la durée de la période de mise en réserve ou d'utilisation de la réserve hydraulique.

II. Conditions climatiques et météorologiques de la Vallée. Mouvement des eaux des lacs

Tous les facteurs climatiques et météorologiques de ce pays s'avèrent très variables, qu'il s'agisse de la température de l'air, de la congélation des lacs, du régime des vents, de la répartition et de l'intensité des précipitations, de la nébulosité, etc.

Du fait de son altitude supérieure à 1000 m et de son orientation S.-W. à N.-E., la Vallée a un *climat* rude. Sa configuration en un bassin fermé empêche l'air refroidi de s'écouler vers le bas et l'oblige à s'étaler en nappes stagnantes. Pendant les nuits hivernales claires et calmes, la température

peut descendre en dessous de −30 °C. En revanche, l'été peut être très chaud; ainsi en juillet et août, des maxima de +30 °C ne sont pas rares, alors que la température moyenne de l'un et l'autre de ces mois est en général de 13,5 -14,0 °C. En raison de l'absence de forêts dans le fond de la Vallée et de la situation encaissée du bassin, par temps calme la radiation nocturne est très intense.

Les moyennes tirées des relevés journaliers effectués depuis le début du siècle à la station météorologique du Sentier, font ressortir de sensibles variations d'un mois à l'autre, et d'une année à l'autre.

Chaque hiver, les lacs de la Vallée gèlent complètement. Sur la base d'observations faites de 1897 à 1956, on peut admettre que la durée moyenne de la *congélation* totale et ininterrompue du lac de Joux est de 79 jours. Mais elle est extrêmement variable d'une année à l'autre. Année moyenne, cette congélation dure de fin décembre à fin mars; la couche de glace atteint 20–30 cm d'épaisseur.

Règle générale, l'atmosphère est rarement calme à la Vallée. En raison de son orientation S.-W. à N.-E., cette région est directement exposée à l'action des *vents généraux*, *bise* (souffle du N.-E.) et *vent* (du S.-W.), dont la prédominance est énorme et l'influence sur la vie du lac considérable (chap. V). Les moyennes annuelles de journées de vent (souffles du N.-W. à E. et du S.-E. à W.) sont de 339 jours pour la période 1912–1929, et de 274 jours pour celle 1930–1956 (dans les observations intéressant cette deuxième série, il n'a pas été tenu compte des vents faibles et variables).

La *pluviosité* est importante, la plus élevée de tout le Jura suisse. En moyenne de 1496 mm par an (valeur tirée d'observations faites au Sentier de 1897 à 1956), elle est due d'une part aux conditions orographiques, d'autre part à l'influence de l'altitude et de l'épais rideau forestier, le 55,5% du bassin d'alimentation étant boisé (non comprise la partie française de la Vallée). La configuration du territoire en un bassin fermé et son orientation S.-W. à N.-E. interviennent également dans la distribution pluviale.

La répartition ou variation annuelle des précipitations présente, elle aussi, une très grande variabilité que mettent bien en évidence les courbes des figures 3 et 4. Il en est de même de l'intensité des chutes d'eau journalières.

Signalons encore que les conditions météorologiques au cours d'une même journée sont sujettes à de brusques changements.

Le lac de Joux constituant un *lac de barrage naturel* exploité pour la production d'énergie électrique, où l'accumulation est pratiquée principale-

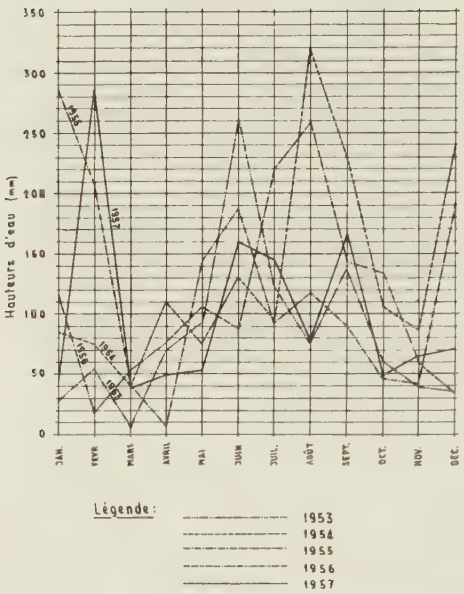


Figure 3
Répartition des précipitations annuelles, station pluviométrique Le Sentier.

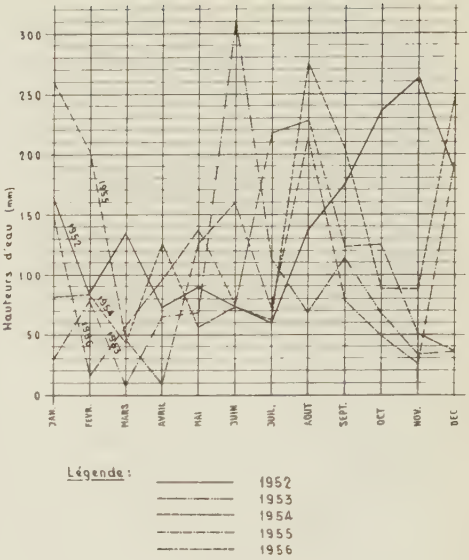


Figure 4
Répartition des précipitations annuelles, station pluviométrique Le Pont.

ment durant les mois d'été, la variabilité des phénomènes météorologiques et hydrologiques se traduit, d'une saison à l'autre, par de fortes fluctuations de niveau du lac, que mettent bien en évidence les courbes de la fig. 5.

Etant donné d'une part l'importance du bassin d'alimentation par rapport à la surface du lac, d'autr epart son régime hydrologique, la fonte des neiges et les maxima de pluie influent directement sur le *mouvement des eaux du lac* et peuvent déterminer de fortes crues. Ainsi en janvier 1955, à la suite de pluies diluviennes et de l'intervention persistante du fœhn, faisant fondre très rapidement la neige jusqu'à 1500 m, le niveau du lac de Joux monte en flèche pour atteindre le 17. 1. la cote exceptionnelle de 1006,04 m (lac Brenet: 1005,69 m).

Il convient ici de souligner un fait très important. Lorsque le niveau du lac de Joux s'élève au-dessus de la cote de retenue, les entonnoirs riverains et les fissures rocheuses ayant échappé au colmatage, entrent en débit actif et évacuent l'eau par le réseau hypogé qui les relie à la source de l'Orbe; ils assurent ainsi une certaine régularisation. Mais le débit de ces exutoires

est faible et l'écoulement des canaux souterrains compliqué très certainement par un ou plusieurs étranglements. Aussi, en cas de crue extraordinaire, le réseau hydraulique souterrain peut arrêter le débit des entonnoirs visibles et des exutoires invisibles; certains entonnoirs riverains du lac de Joux, à l'exclusion des autres, au lieu d'absorber l'eau superficielle, rejettent celle qui ne peut trouver place dans les conduits souterrains. Ce phénomène étrange et impressionnant du *reflux* a lieu aussi par certaines cavités indépendantes des entonnoirs et de l'écoulement des lacs. Tel est le cas notamment aux Chaudières d'Enfer, en dessus du village de l'Abbaye.

Quant à l'influence de la congélation hivernale, elle se traduit en général par une baisse graduelle de niveau en février-mars. Cette baisse peut toutefois être irrégulière et capricieuse (fig. 5).

Enfin, l'exploitation des lacs sous forme d'une retenue différentielle influe dans une large mesure sur le mouvement des eaux du lac de Joux, contribuant à accentuer ou à atténuer les variations de niveau, selon l'importance du débit réservé et la durée de la période de mise en réserve ou d'utilisation de la réserve hydraulique.

III. Ravitaillement en eau potable de la Vallée. Evacuation des eaux usées

En raison de l'importance du couvert forestier et de la situation des principaux points d'eau, la répartition géographique des agglomérations de la Vallée n'est pas uniforme (fig. 1).

Des trois communes que compte ce district, celle du *Chenit* (fractions de commune du *Brassus*, du *Sentier* et de *L'Orient*), dont les diverses agglomérations sont plus ou moins disséminées dans le fond du thalweg, s'est développée à un rythme assez rapide et régulier au cours des vingt dernières années, en raison de l'essor de l'industrie horlogère; de 1941 à 1957, l'accroissement de la population résidentielle a été de 25% (5220 habitants à fin 1957). Par contre, la population est demeurée relativement stable dans la commune de *L'Abbaye* (villages des *Bioux*, de *L'Abbaye* et du *Pont*, sur la rive orientale et à l'extrémité N.-E. du lac de Joux) et dans celle du *Lieu* (villages du *Lieu*, du *Séchey* et des *Charbonnières*, dans le vallon secondaire).

Etant donné l'important développement du Chenit, le problème de l'alimentation en eau potable de cette commune présente à l'heure actuelle un grand intérêt. Les besoins des divers réseaux de distribution du Chenit sont de l'ordre de 300 l/hab./jour.

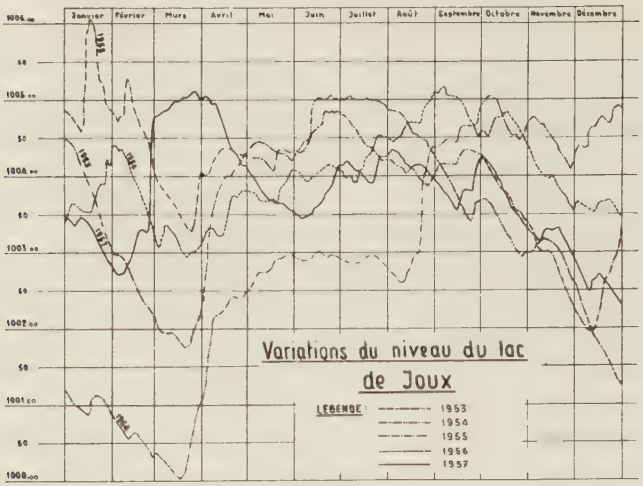


Figure 5

Bien que convenablement arrosée, la vallée de Joux n'a pas un sol propre à l'emmagasinement de l'eau; d'une manière générale, les conditions de gisement des eaux souterraines sont peu favorables, en raison du comportement des roches. Rappelons ici que les eaux d'infiltration sont rapidement absorbées par les fissures de la roche calcaire et ne sont retenues que lorsque se présentent des niveaux marneux assez épais et imperméables. De ce fait, les ressources en eaux souterraines utilisables sont asservies depuis longtemps, pour une distribution à domicile intéressant pratiquement toutes les agglomérations.

Le flanc occidental de la chaîne du Mont-Tendre présente une succession de quelque cinquante petites sources, certaines plus abondantes, qui avec les grandes résurgences du Brassus et de la Lionne (fig. 2) fournissent la majeure partie de l'eau de consommation. La *source du Brassus* offre un grand intérêt économique; de plus en plus, l'alimentation en eau potable de la commune du Chenit est assurée par cette résurgence, caractérisée par une température remarquablement constante, ce qui est aussi le cas de la *source de la Lionne*.

La plupart de ces sources sont de *nature vauclusienne*; plusieurs se troublent lorsque de fortes précipitations interrompent brusquement une période sèche. Subissant l'influence du sol, leurs eaux utilisées pour la consommation doivent en majorité être soumises à une désinfection.

La Vallée compte également plusieurs puits qui tirent leur eau de nappes

phréatiques peu étendues, en particulier dans le vallon secondaire du Solliat.

Sur le versant N.-W. de la Vallée et sur la crête du Mont-Tendre, en raison de la rareté des points d'eau, un grand nombre de fermes et de chalets isolés ne disposent que d'une citerne d'eaux pluviales.

Signalons enfin que, par suite de l'extension générale des adductions d'eau et de l'accroissement parallèle de la consommation d'eau, la *pratique du tout à l'égout* s'est fortement généralisée depuis quelques années. Aussi le déversement d'un grand nombre d'égouts, surtout aux deux extrémités du lac, ainsi que sur la rive orientale, constitue un important facteur de pollution pour le lac de Joux (fig. 2).

DEUXIÈME PARTIE

ÉTUDE HYDROBIOLOGIQUE DU LAC DE JOUX

IV. Programme des recherches

A la suite de prospections et de sondages itératifs effectués en mai et juin 1953, tenant compte de l'allure du relief immergé et des sources de pollution, nous avons effectué des observations systématiques à l'intérieur des « fosses » mentionnées au chap. I, dans lesquelles les conditions sont les moins favorables en raison d'une stagnation plus ou moins longue des eaux, et conjointement nous avons étudié l'influence des apports d'eaux usées et celle des principaux affluents.

14 stations d'observation ont été choisies sur le lac de Joux, soit une station par 0,62 km², et pour le lac Brenet une station par 0,86 km² (fig. 2). Deux autres stations, de référence, ont été fixées: dans l'Orbe au pont des Crêtets, immédiatement à l'aval de la zone de concentration des égouts du Chenit; dans la Lionne en dessous du pont vers la fabrique de limes, quelques mètres à l'aval du débouché du collecteur principal des égouts du village de L'Abbaye. Le tableau ci-après renseigne sur la situation des 17 stations et la profondeur maximum sondée (tabl. 1).

La prise des échantillons d'eau et de plancton a été faite aux profondeurs suivantes, en tenant compte chaque fois de la cote du niveau du lac ($\pm$ 0,50 m): surface, puis à 3 ou 4 m (selon la profondeur du fond au point examiné), ensuite de 5 en 5 m jusqu'à 4–4,5 m du fond, enfin à 50 cm du fond aux cinq principales stations B, E, F, J et M (profil longitudinal). Ce

Tableau 1
Emplacements des stations et profondeur du fond

Station	Emplacement	Distance perpendiculaire à la rive la plus proche	Profondeur maximum sondée[1])
A	*Haut lac*, à mi-distance du canal des entonnoirs du Rocheray et de la pointe Vers Chez Aron	520 m	12 m
B	500 m E.-S.-E. de la pointe des *Esserts-de-Rive*	450 m	18 m
C	450 m *Ouest* de la pointe *Vers Chez Grosjean*	430 m	18 m
D	480 m *Nord* de la pointe *Vers Chez Grosjean*	500 m	23 m
E	600 m *Sud* des entonnoirs de la *Roche Fendue*	500 m	33,5 m
F	700 m E.-S.-E. des entonnoirs de la *Roche Fendue*	480 m	32 m
R.F.	100 m *au droit* de l'entonnoir principal de la *Roche Fendue*	100 m	23 m
G	Talus devant *Groinroux*, 850 m W.-S.-W. de la Sauvagère	250 m	23 m
H	*Les Rochettes*, 1,4 km N.-E. des entonnoirs de la Roche Fendue	120 m	18 m
J	850 m W.-N.-W. de l'*embouchure de la Lionne*	300 m	31 m
K	700 m W.-S.-W. de l'*embouchure de la Lionne*	300 m	23 m
L	750 m *Nord* de l'*embouchure de la Lionne*	330 m	23 m
M	*Bas lac*, 150 m S.-S.-E. de la prise CVE. Epinettes	130 m	28,5 m
Br.	*Lac Brenet*, 300 m E.-S.-E. de l'entonnoir Neuf	180 m	17,5 m
F.O.	*Fil de l'Orbe*, 850 m N.-E. de l'embouchure de l'Orbe	270 m	3,7 m
O.C.	*L'Orbe*, sous le pont de la route des *Crêtets*		—
Ly.	*La Lionne*, à l'aval du pont vers fabrique de limes de L'Abbaye	—	

[1]) Par rapport à cote 1005,00 m pour lac de Joux
1001,80 m pour lac Brenet

choix a été dicté par des considérations pratiques: les niveaux de prélèvement, correspondant à des tranches d'eau de 1 m, sont localisés aux mêmes profondeurs par rapport à la cote 1005,00 m.

Dans l'Orbe et la Lionne, les prélèvements ont été opérés en surface, au Fil de l'Orbe à environ 1 m de profondeur.

L'étude a comporté les prises suivantes, une fois par mois, de juillet 1953 à février 1956:

- pour analyses chimiques et bactériologiques: 65–75 échantillons d'eau, aux 16 stations intéressant le lac de Joux;
- pour étude qualitative et quantitative du plancton pélagique: 15–25 échantillons, aux stations B, E, J et M.

Des pêches littorales de plancton ont été faites mensuellement en 1955, en cinq endroits désignés: P_1–P_5 (fig. 2).

Dans le lac Brenet, à part des prises d'échantillons d'eau en vue d'analyses chimiques et bactériologiques comparatives, effectuées de 4 en 4 m dès la surface, seules quelques pêches de plancton ont été faites au moyen d'un filet, pour un inventaire des espèces.

Quant aux prélèvements de sédiments, ils ont été effectués en mai et en septembre 1955, aux stations Fil. Orbe, B, E, J et M; en juin 1956 en six endroits de la région littorale: sur la rive orientale, au large de *Vers Chez Aron* (*Les Bioux*), de *Groinroux* et des *Prés des Rives*; sur la rive occidentale, dans le golfe du *Rocheray* (*Le Moulin*) et au S.-W. de la pointe de *Bégroy*; enfin devant le village du *Pont*, en face du collège. Tous ces points se trouvent au large de la grève caillouteuse. Devant *Les Rochettes* (*Le Revers*), où les rochers plongent à pic, aucun draguage ou carottage de sédiments n'a pu être effectué.

Enfin en septembre 1956, des prélèvements à la benne, pour l'étude de la faune littorale, ont été faits en onze autres points dans le secteur: Haut lac – *Esserts de Rive* – *Vers Chez Grosjean*.

Afin d'obtenir des résultats plus complets et surtout procéder à d'utiles vérifications, nous avons mis en œuvre parallèlement diverses techniques de prise d'échantillons et de mesure de température.

Le treuil utilisé pour les sondages et prélèvements est pourvu d'un compte-tours gradué en cm, dm et m, donnant la profondeur en lecture directe.

Les *mesures de température* ont été faites, d'une part de mètre en mètre au moyen d'une sonde thermo-électrique à semi-conducteur (thermistor), d'autre part aux différentes profondeurs de prélèvement avec le thermomètre classique à renversement, accouplé à la bouteille de prise d'eau.

La *transparence* a été étudiée par la méthode de Secchi, avec un disque blanc de 30 cm observé au moyen d'une lunette à eau.

Les *prises d'échantillons d'eau* pour les analyses chimiques et bactériologiques, ont été effectuées à l'aide d'une sonde métallique à couvercles étan-

ches, d'une contenance de 5 l, prélevant toute l'eau nécessaire pour ces divers examens. L'utilisation de cette «bouteille» permet d'éviter deux ou plusieurs plongées, ce qui est le cas avec d'autres appareils, et assure par conséquent une meilleure homogénéité aux échantillons provenant de la même profondeur.

Les *récoltes de plancton* ont été faites selon trois procédés: *méthode de la pompe*, pour l'étude qualitative et quantitative du plancton pélagique, en prélevant respectivement 20 et 100 l (à la station J, les prises ont été faites non aux profondeurs indiquées plus haut, mais à des niveaux intermédiaires); *pêches comparatives avec un filet fin* (gaze standard à 77 fils/cm), d'une part verticales avec une vitesse de relevée de 50 cm par seconde, d'autre part horizontales à la profondeur de 1 m environ, en traînant le filet pendant 5 minutes sur 300 m; enfin, *prises comparatives avec la sonde* prémentionnée, à la station J uniquement, en prélevant 4 × 5 l aux différents niveaux étudiés.

Des comparaisons quantitatives ne peuvent être établies entre les captures faites par ces divers procédés, bien que toutes les récoltes aient été ramenées à des volumes égaux. Ces techniques sont en effet fort différentes: le pompage sollicite à un niveau donné une couche ou tranche, en provoquant un appel d'eau dans un certain rayon de la bouche d'aspiration; la pêche par trait vertical, au contraire, sollicite une colonne de faible section (diamètre d'ouverture du filet: 20 cm; quantité d'eau filtrée: 31,4 l par intervalle de profondeur de 1 m); quant à la sonde, elle prélève en un point donné une quantité d'eau limitée. En utilisant de front les trois procédés, nous avons simplement voulu compenser dans une certaine mesure les causes d'erreur inhérentes aux engins, et vérifier la répartition verticale des Rotateurs et Protozoaires, de 10 en 10 m.

Les *prélèvements de sédiments*, pour les examens chimiques et biologiques, ont été faits à l'aide d'une benne-preneuse de 0,85 dm^3, qui extrait une motte d'environ 4 cm d'épaisseur; quel que soit le genre de sédiment, la section de la motte demeure constante (190 cm^2).

Bien que le but principal de nos recherches fut d'étudier l'état actuel du fond, il nous a paru intéressant d'examiner également l'évolution des matières organiques incluses dans les sédiments, par une analyse comparative des différentes couches superposées. A cet effet, nous avons utilisé un appareil carottier à tube de verre de 70 cm, d'un diamètre intérieur de 20 mm, enfoncé dans la vase à l'aide d'un bélier.

Enfin, pour évaluer l'épaisseur et étudier la composition du *dépôt annuel de vase dans la région profonde*, les carottes de sondage ne montrant aucune

alternance de strates foncées et de strates claires, nous avons eu recours à la technique de THOMAS[1]), qui consiste à immerger sur le fond du lac un bac à sédimentation maintenu horizontalement, quelle que soit l'inclinaison du sol. D'une contenance de 7,5 l et d'une section utile de 460 cm² environ, ce récipient a été déposé sur le fond de la cuvette centrale (station E), durant une année dès fin avril 1956, et relevé périodiquement dans des conditions excluant toute perte.

En ce qui concerne les *méthodes analytiques* appliquées, tant physico-chimiques que biologiques, nous renvoyons au travail original.

V. Température et transparence des eaux

Avant d'aborder l'étude du lac de Joux au point de vue thermique, il convient de rappeler que dans toute masse d'eau stagnante, du printemps à la fin de l'été les couches de fond, en raison de leur éloignement de l'air et du soleil, ne s'échauffent que très lentement; les couches superficielles au contraire, fortement soumises aux influences extérieures, s'échauffent (ou se refroidissent) dans une mesure plus considérable. D'où une *stratification* dite *thermique*, les eaux se disposant par couches suivant l'ordre de leur température, donc de leur densité. On reconnaît trois assises distinctes, appelées de haut en bas: *épilimnion*, couche superficielle remuée par les vents, réchauffée par le soleil, etc.; *métalimnion* ou *thermocline*, couche intermédiaire caractérisée par une chute brusque de la température (saut thermique); *hypolimnion*, couche inférieure dans laquelle la température décroît lentement.

Cette stratification est directe quand la température de la masse lacustre est tout entière supérieure à 4 °C (température à laquelle l'eau douce présente donc son maximum de densité); elle est inverse dans le cas contraire, entre 0 et 4 °C, cette disposition inversée des couches d'eau se présentant dans les lacs recouverts de glace en hiver. Elle est annulée par les phénomènes de circulation, en automne lors du refroidissement de l'eau plus chaude que 4 °C, au printemps lors du réchauffement de l'eau plus froide que 4 °C, l'intervention du vent créant ou favorisant la circulation.

Le régime thermique du lac de Joux est caractérisé par une *stratification alternante:* directe en été, la température décroissant de la surface vers le fond; inverse en hiver, la température augmentant légèrement de la surface vers le fond. Ces périodes d'équilibre sont séparées par deux périodes

[1]) Revue suisse d'hydrologie *2*, fasc. 1, 25–37 (1950).

d'uniformisation, durant lesquelles la circulation des eaux devient totale. En outre, la température du fond est sujette à de fortes variations, qui suivent d'assez près celles de la température de surface.

Ces faits sont illustrés par les diagrammes suivants: la fig. 6 renseigne sur la distribution thermique à la station centrale E, la plus profonde; la fig. 7 traduit les variations saisonnières de température à cette station; enfin, les graphiques de la fig. 12 expriment les mêmes relations pour la température moyenne aux différents niveaux étudiés.

Le lac de Joux rentre donc dans la catégorie des lacs du *type tempéré* décrit par FOREL. Il appartient au *2e ordre* de ce type, puisqu'en raison de sa profondeur relativement faible la température des eaux profondes varie de façon notable au cours de l'année. Il s'agit enfin d'un *lac holomictique*, vu que la circulation des eaux se produit dans tout le volume du lac.

La durée des quatre phases du cycle thermique dépend étroitement des faits météorologiques, en liaison avec le cycle des saisons. Rappelons ici que les conditions climatiques et météorologiques de la Vallée sont sujettes à de sensibles variations d'une année à l'autre, ainsi qu'au cours de la même année.

Année normale, la circulation vernale débute en avril, avec la débâcle de la couche de glace; celle automnale commence avec les froids d'octobre. Durant les mois d'août et de septembre, l'hypolimnion ne s'échauffe que fort peu; d'un mois à l'autre, les variations de température des couches profondes sont minimes (moins de 0,4 °C). A ce stade d'équilibre thermique correspond une stagnation affectant la zone comprise entre 13–14 m et le fond (tableau 2). Nous en trouverons la confirmation en examinant le régime de l'oxygène. Quant à la stagnation hivernale, assurée par la couverture de glace, elle dure normalement de janvier à mars et immobilise pratiquement toute la masse lacustre.

Un *thermocline* bien caractérisé n'est observable qu'en juillet et août; en général de puissance variable d'un point à l'autre, il indique la limite du réchauffement et du refroidissement journaliers. En fait, durant l'été on peut distinguer deux assises superposées: l'une superficielle ou épilimnique, jusqu'à 13–14 m de profondeur, soumise tant aux variations de température diurnes et nocturnes qu'à l'action du vent; l'autre profonde ou hypolimnique, où les variations de la température sont faibles.

Parmi les principales causes des modifications thermiques, l'une des plus importantes est l'*action des vents dominants*, bise et vent du S.-W. En raison de son exposition particulière et de sa forme très allongée, la nappe lacustre est directement sous l'influence de ces souffles. Seul le bas lac est

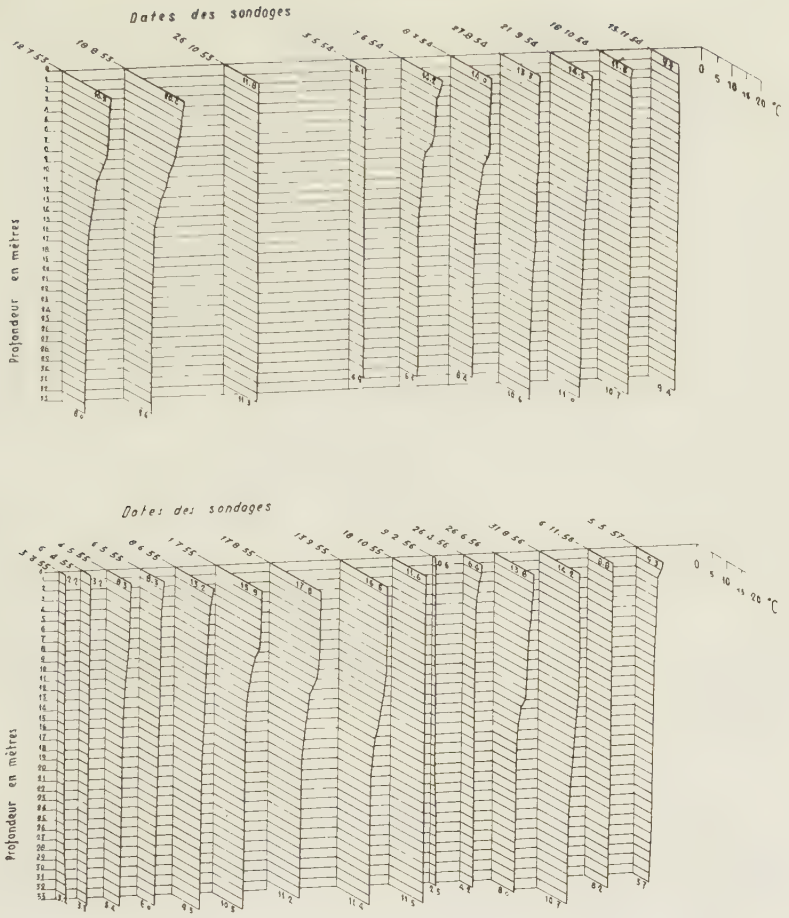


Figure 6
Diagrammes des températures à la station E.

protégé des effets de la bise par la Dent de Vaulion, alors que l'extrémité méridionale, au niveau du thalweg, subit pratiquement l'influence de tous les vents.

Cette action se traduit par un mélange des couches d'eau superficielles et subsuperficielles. En outre, par les courants internes engendrés, les vents généraux peuvent provoquer un afflux en surface d'eaux ailleurs profondes, et modifier ainsi la régularité de la stratification thermique.

A ce propos, notons que la plupart des monts sous-lacustres constituent

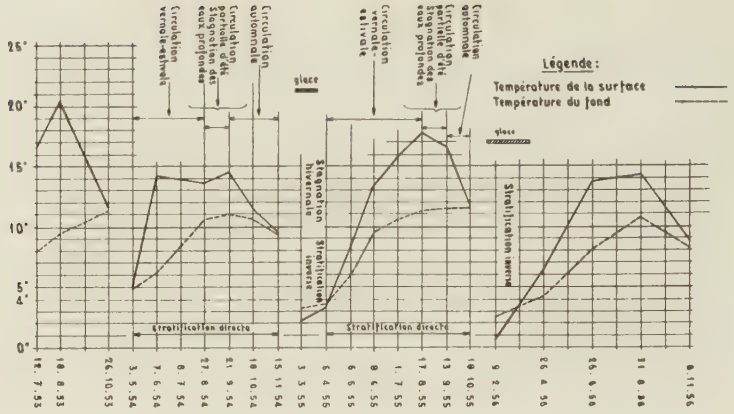


Figure 7
Marche de la température et mouvement de l'eau à la station E.

Tableau 2
Températures moyennes de l'eau aux différents niveaux
Moyennes mensuelles des mesures faites aux stations
B, D, E, F, R.F., G, J, K et M

Prof.	0 m	5 m	10 m	15 m	20 m	25 m	30 m	fond, sta. E-F-J	Temp. moy. fond:
1953									
Juil.	16,2°	15,0°	10,9°	9,7°	9,2°	8,7°	8,1°	8,0°	8,1°
Août	20,7°	18,2°	14,1°	10,6°	9,9°	9,7°	9,6°	9,6°	9,6°
Oct.	11,6°	11,6°	11,5°	11,5°	11,5°	11,5°	11,4°	11,3°	11,3°
1954									
Mai	5,6°	5,3°	5,3°	5,2°	5,2°	5,2°	5,0°	5,0°	5,0°
Juin	12,5°	11,7°	8,4°	7,5°	6,8°	6,5°	6,2°	6,1°	6,7°
Juil.	14,3°	13,9°	11,6°	9,5°	8,9°	8,6°	8,4°	8,4°	8,7°
Août	15,6°	13,7°	13,2°	*12,6°*	*11,9°*	*11,0°*	*10,9°*	*10,8°*	11,2°
Sept.	14,4°	14,0°	13,7°	*12,9°*	*12,2°*	*11,4°*	*11,2°*	*11,1°*	11,6°
Oct.	11,6°	11,3°	11,2°	11,2°	11,2°	11,0°	10,8°	10,8°	11,0°
Nov.	9,6°	9,5°	9,5°	9,5°	9,5°	9,5°	9,4°	9,4°	9,4°
1955									
Mars	*2,1°*	*2,2°*	*2,3°*	*2,4°*	*2,4°*	*2,5°*	*2,7°*	*3,0°*	3,0°
Avril	*3,3°*	*3,3°*	*3,3°*	*3,3°*	*3,3°*	*3,3°*	*3,4°*	*3,5°*	3,5°
Mai	8,4°	8,3°	8,0°	7,7°	7,6°	6,9°	6,4°	6,4°	6,6°
Juin	12,6°	12,1°	11,2°	10,2°	9,8°	9,7°	9,7°	9,6°	9,5°
Juil.	17,3°	16,0°	12,0°	11,2°	11,0°	10,8°	10,7°	10,6°	10,7°
Août	18,6°	17,2°	15,6°	12,4°	*11,6°*	*11,4°*	*11,2°*	*11,2°*	11,4°
Sept.	15,4°	15,0°	14,5°	13,3°	*11,8°*	*11,7°*	*11,5°*	*11,5°*	11,6°
Oct.	11,6°	11,5°	11,4°	11,4°	11,4°	11,4°	11,4°	11,4°	11,4°
1956									
Févr.	*0,6°*	*1,2°*	*1,3°*	*1,5°*	*1,8°*	*2,1°*	*2,5°*	*2,5°*	2,5°

des écrans susceptibles de perturber les courants sous-lacustres dus aux grands vents.

Etant donné les caractéristiques morphologiques de la cuvette lacustre, celles hydrologiques du bassin d'alimentation, enfin les conditions d'exploitation du lac à des fins hydro-électriques (accumulation pratiquée surtout pendant les mois d'été), le *courant profond de l'Orbe* joue un rôle prépondérant dans le réchauffement du fond du lac. Cette influence des eaux de l'Orbe chargées de particules minérales en suspension, par conséquent plus denses que l'eau limpide à température égale, se traduit par une élévation progressive de la température des eaux profondes, qui atteint 11,5–11,6 °C à la fin de la stagnation estivale (12,6–12,7 °C dans le lac Brenet). A l'action directe de la rivière en profondeur vient s'ajouter le réchauffement général favorisé par l'intervention du vent.

Variant entre 2 et 8 m, la *transparence* moyenne des eaux est d'une manière générale faible pendant la période de végétation, année normale d'avril à octobre. Elle évolue en fonction des principaux facteurs suivants: abondance du plancton et, par conséquent, intensité des phénomènes d'assimilation; conditions thermiques dans les couches superficielles; enfin, régime des pluies et des vents.

Quant à la *couleur de l'eau* en plein lac, elle est toujours vert-jaune, coloration prenant rang entre les numéros VIII et X de la gamme FOREL.

VI. Caractéristiques physico-chimiques des eaux

Avant d'analyser les observations recueillies sur l'évolution des principaux facteurs physico-chimiques des eaux des lacs de Joux et Brenet, il n'est pas sans intérêt d'évoquer les phénomènes qui s'accomplissent dans le milieu aquatique. La stratification thermique et les mouvements de l'eau ont, en effet, des conséquences importantes sur le *cycle biochimique* de toute masse d'eau stagnante.

Rappelons que ce cycle trouve son origine dans les matières nutritives en solution dans l'eau; substances fertilisantes provenant du lessivage des terrains avoisinants, des apports des affluents, de la dégradation des matières polluantes déversées, enfin de la décomposition du plancton et des plantes aquatiques (fig. 8).

Utilisant les radiations lumineuses solaires, les organismes chlorophylliens (algues planctoniques et plantes supérieures) assimilent les éléments minéraux et le gaz carbonique dissous, et les transforment par photosynthèse en matières organiques formant la substance cellulaire des tissus

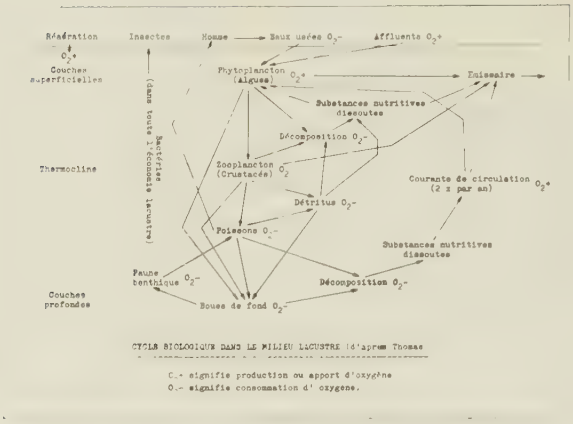


Figure 8
Cycle biologique dans le milieu lacustre (d'après Thomas).

végétaux, fournissant ainsi la nourriture nécessaire aux organismes peuplant le lac.

A l'état vivant ou à l'état mort, dans ce cas sous forme de détritus, les constituants du phytoplancton servent de proie aux divers organismes de la faune aquatique inférieure (Crustacés notamment); à son tour, le zooplancton est consommé par le poisson, dont il constitue la nourriture principale. Alors que le phytoplancton est localisé essentiellement dans les couches supérieures exposées aux rayons solaires, le zooplancton et le poisson peuvent se rencontrer plus profondément.

S'ils n'ont pas été capturés par les espèces supérieures, les innombrables organismes du plancton – dont la vie est éphémère – tombent en pluie lente et continue dans les couches profondes, et sont décomposés par les bactéries. Une partie de leurs cadavres tombe jusqu'au fond et vient s'incorporer aux sédiments, où leur décomposition est réalisée par l'intervention des bactéries et organismes benthiques.

La réduction des matières organiques est due en premier lieu aux bactéries, présentes dans tout le lac (masse des eaux et sédiments). Par le mécanisme de la désagrégation et de la minéralisation, elle permet la solubilisation de tous les déchets organiques issus des plantes et des animaux, et la réintégration dans le cycle biologique des éléments nutritifs qui conditionnent la production végétale. Ces éléments viennent tout d'abord enrichir les eaux profondes, puis sont retransportés dans les couches superficielles par la prochaine circulation totale, pour reprendre part au cycle évolutif de la matière.

Il est donc clair que plus la quantité de substances nutritives mises en jeu, notamment à partir des sédiments, est grande, plus la productivité du lac augmente. D'ou un développement exagéré du plancton, préjudiciable à la santé du lac. Les cadavres et résidus planctoniques qui tombent continuellement ne cessent d'apporter aux sédiments un surcroît de substances organiques, dont les produits de décomposition s'accumulent; d'où formation de vase putride.

C'est ici qu'intervient un phénomène capital de la vie des lacs: l'*évolution de l'oxygène dissous* (fig. 8). La désagrégation et la minéralisation subséquente des résidus organiques consomment beaucoup d'oxygène.

Ce gaz est libéré par l'activité photosynthétique des végétaux, sa production pouvant être intense – par temps ensoleillé et chaud – lorsque le milieu contient beaucoup d'organismes chlorophylliens. La réalimentation en oxygène est aussi assurée par les apports d'eaux aérées des affluents et des pluies, et par les échanges avec l'atmosphère (réaération en surface). Relevons ici que les vents et les vagues exercent un rôle considérable dans la réoxygénation de toute masse d'eau stagnante.

Les phénomènes de circulation ont pour effet de répartir l'oxygène dans les différentes couches d'eau, jusqu'au niveau des sédiments lorsque la circulation est totale, permettant ainsi au lac de refaire sa provision d'oxygène. Par contre, pendant les phases de stratification thermique, l'hypolimnion demeurant soustrait aux influences solaire et atmosphérique, tout au moins dans les lacs d'une certaine profondeur, reste isolé des couches supérieures et de tout apport d'oxygène; aussi le taux d'oxygène dissous diminue progressivement avec la profondeur, d'autant plus que la période de stagnation dure plus longtemps et que les eaux profondes contiennent davantage de substances réductrices, tant organiques que minérales.

Lorsque la production organique du lac, sous la dépendance de la fertilité du milieu, est disproportionnée par rapport à la réserve d'oxygène de l'hypolimnion disponible pour la minéralisation des matières organiques produites ou introduites dans le lac, l'équilibre biochimique de ce dernier est rompu. L'oxygène finit par disparaître à proximité du fond, le gaz carbonique libéré par les combustions organiques (décompositions bactériennes) et par la respiration des êtres aquatiques augmente graduellement avec la profondeur, cet accroissement étant d'autant plus marqué que les phénomènes de putréfaction à la surface des sédiments sont intenses. Cette action biologique se poursuit par une production d'hydrogène sulfuré, de sulfures et autres substances réductrices, qui créent et main-

tiennent un état d'anaérobiose dans l'hypolimnion. Le milieu réducteur favorise la dissolution de divers éléments des sédiments: carbonates, magnésium, fer, manganèse, silice, sels phosphorés et azotés, etc.

C'est dire combien les phénomènes de production et de consommation, combinés à ceux de stagnation et de circulation, peuvent avoir des répercussions profondes sur l'évolution d'une masse d'eau lacustre.

Ceci nous amène à considérer le problème de la *productivité des lacs*.

Dans les lacs pauvres en matières nutritives, la photosynthèse est réduite, la production de matières organiques donc limitée, le plancton et les dépôts lacustres peu abondants. D'où faible consommation d'oxygène pour la décomposition et la minéralisation des déchets organiques, en sorte que la teneur en oxygène des eaux profondes ne diminue jamais beaucoup, même en été. Ordinairement profonds, ces lacs en bonne santé sont dits *oligotrophes* (nourrissent peu).

Inversément, dans les lacs riches en matières nutritives et, partant, à production abondante de substances organiques, la prolifération du plancton, tant végétal qu'animal, est intense pendant l'été. Par conséquent, la quantité de déchets qui s'accumulent au fond des eaux est importante. D'où forte consommation d'oxygène, la réserve d'O_2 de la zone profonde pouvant, le cas échéant, s'épuiser pendant les périodes de stagnation. En général peu profonds, ces lacs sont dits *eutrophes* (nourrissent bien); leur eau est le plus souvent calcaire, donc propice au développement du plancton. Ce sont des lacs malades.

Cet aperçu du cycle biochimique des lacs permet, en examinant les clichés suivants, de constater que le lac de Joux présente la plupart des particularités d'un lac eutrophe.

Considérons tout d'abord le *régime de l'oxygène*, le plus significatif des facteurs d'une masse d'eau.

Les diagrammes de la fig. 9, qui indiquent la quantité d'oxygène dissous et le degré de saturation aux différentes profondeurs à la station centrale E (l'allure des courbes de variation est la même à toutes les stations), montrent qu'en période de circulation totale, tant au printemps qu'en automne, l'oxygène est réparti de façon homogène dans toute la masse des eaux du lac, de la surface jusqu'au fond. Par suite de la prolifération abondante du phytoplancton, nous reviendrons sur ce point, les couches superficielles sont le siège d'une surproduction d'oxygène en fin de printemps et pendant les mois d'été; il s'ensuit de fortes sursaturations, presque constantes, qui par temps ensoleillé et chaud peuvent atteindre et même dépasser 140% en surface. Les sursaturations observées correspondent

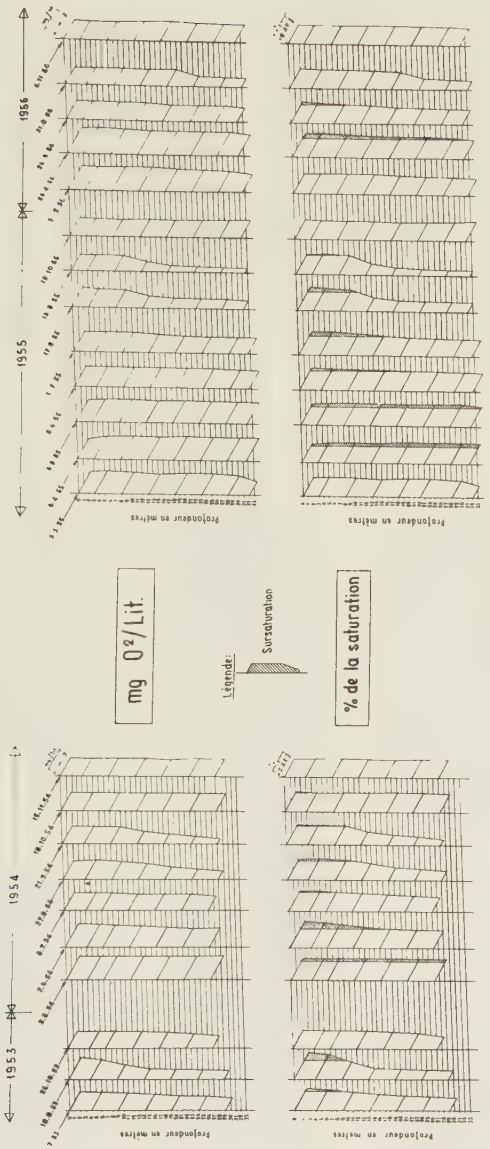


Figure 9
Variations de l'oxygène dissous à la station E, 1953/56.

essentiellement aux phases de développement des deux Diatomées-clefs *Asterionella formosa*, puis *Tabellaria fenestrata*, enfin du Péridinien *Ceratium hirundinella*, dont nous reparlerons.

En revanche, sous le thermocline, dès le mois de juin le taux d'oxygène diminue progressivement avec la profondeur. Durant la phase de stagnation en août-septembre, il accuse une chute brusque dans la zone de transition du métalimnion, cette baisse s'observant entre les niveaux 8–9 m et 13–14 m à la plupart des stations (fig. 10). En septembre, la teneur en oxygène des fonds tombe en dessous de 40%, limite caractéristique de l'eutrophie; dans la «fosse» à l'extrémité aval du lac de Joux, la réserve d'oxygène des couches profondes s'appauvrit dans une mesure considérable, alors qu'elle s'épuise dans le fond du lac Brenet (fig. 11). Ce

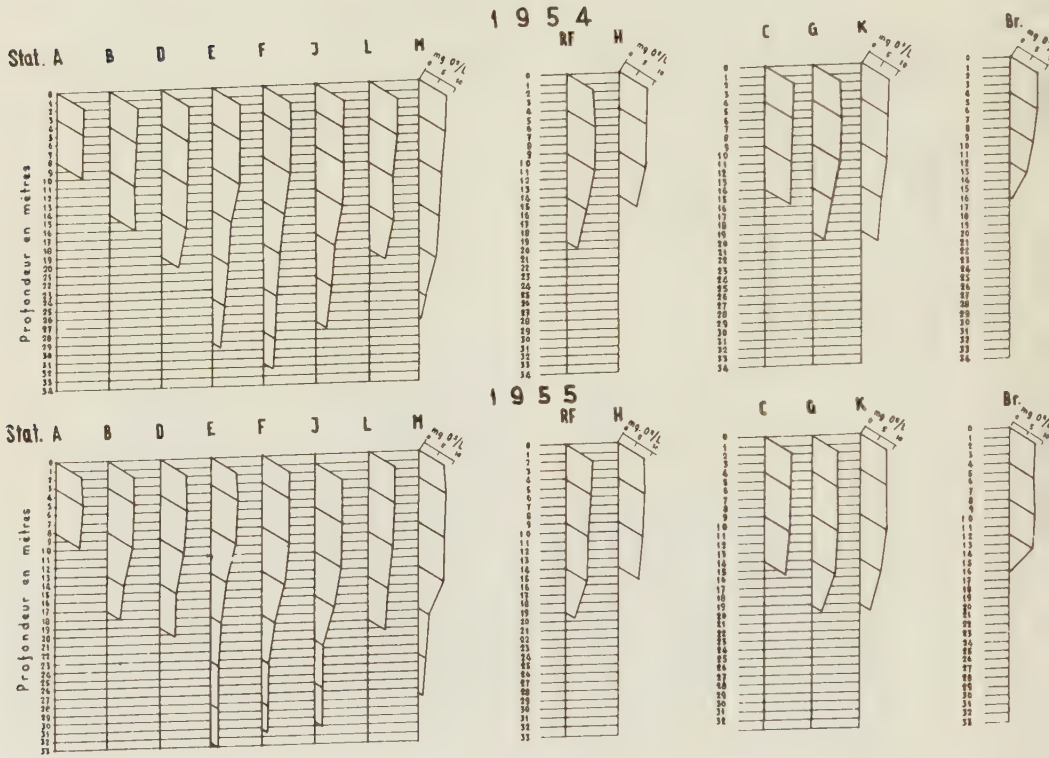


Figure 10
Répartition de l'oxygène dissous en mg O_2/l à la fin des stagnations estivales de 1954 et 1955.

Légende:

Zones		21-24 9 54		13,14,20-21 9 55.	
		mg.O²/L	Taux de saturation %	mg.O²/L	Taux de saturation %
Joux		2,8-3,7	30-40	2,3-3,3	25-35
		< 2,6	< 28	< 2,6	< 28
Brenet	fond	< 0,1	< 1	< 0,1	< 1

Figure 11
Extension schématique des fonds pauvres en oxygène dissous, sept. 54 et sept. 55 (Joux: nappes de 4–4,5 m, au-dessus du fond).

déficit en oxygène de l'hypolimnion est d'autant plus élevé que la phase de stagnation thermique et celle parallèle d'accumulation hydraulique pratiquée par la C.V.E. durent plus longtemps. En résumé, des fonds pauvres et même très pauvres en oxygène dissous, tel est l'aspect de la situation dans les deux lacs à la fin de la stagnation estivale.

Par contre-coup, les couches profondes que les phénomènes de circulation ne peuvent réapprovisionner à longue échéance en oxygène, s'enrichissent en *gaz carbonique libre*, dont une fraction notable se trouve sous forme de CO_2 *agressif*. Corollairement, le pH accuse une forte baisse, très apparente à proximité du fond.

Les courbes de la fig. 12, qui expriment les relations entre la température, l'oxygène, le gaz carbonique libre, le pH et l'alcalinité, sont significatives et soulignent bien l'état d'eutrophie du lac de Joux. L'allure des courbes du CO_2 libre est symétrique de celle des courbes de l'oxygène dissous, ces dernières concordant de façon assez régulière avec les courbes de variation de la température (sauf, bien entendu, en phase de stratification inverse); en périodes de circulation, ces courbes sont sensiblement parallèles; mais durant les périodes d'équilibre thermique, tout particulièrement pendant la stagnation des eaux profondes en août-septembre 1954 et 1955, mars 1955 et février 1956, les courbes du CO_2 sont inverses de celles de l'oxygène; cette particularité est propre aux lacs eutrophes. Les courbes de variation du pH et du CO_2 libre présentent, elles aussi, un caractère de symétrie; à une augmentation du CO_2 correspond une diminution du pH et vice versa, le pH étant lié à la teneur en gaz carbonique. Enfin, l'alcalinité totale, qui donne la mesure des bicarbonates dissous, et le CO_2 libre, varient dans le même sens; la concordance des courbes est en général bonne.

Notons encore qu'à la suite du brassage des eaux par la circulation vernale ou celle automnale, le CO_2 libre est réparti assez uniformément dans toute la masse lacustre, comme le CO_2 des bicarbonates. Mais en fin de printemps et durant l'été, par suite du développement abondant du phytoplancton et de son intense activité photosynthétique mise en évidence par les fortes sursaturations en O_2 observées de juin à août, l'assimilation du CO_2 par les organismes chlorophylliens, en provoquant une élévation du pH, entraîne une diminution de la solubilité des bicarbonates; d'où précipitation de cristaux de carbonate calcique qui tombent en pluie fine jusqu'au fond, pour s'incorporer aux sédiments. Cette *décalcification biologique* affectant l'épilimnion se traduit par une baisse sensible non seulement de l'alcalinité (dureté passagère), mais aussi de la dureté totale, l'eau du

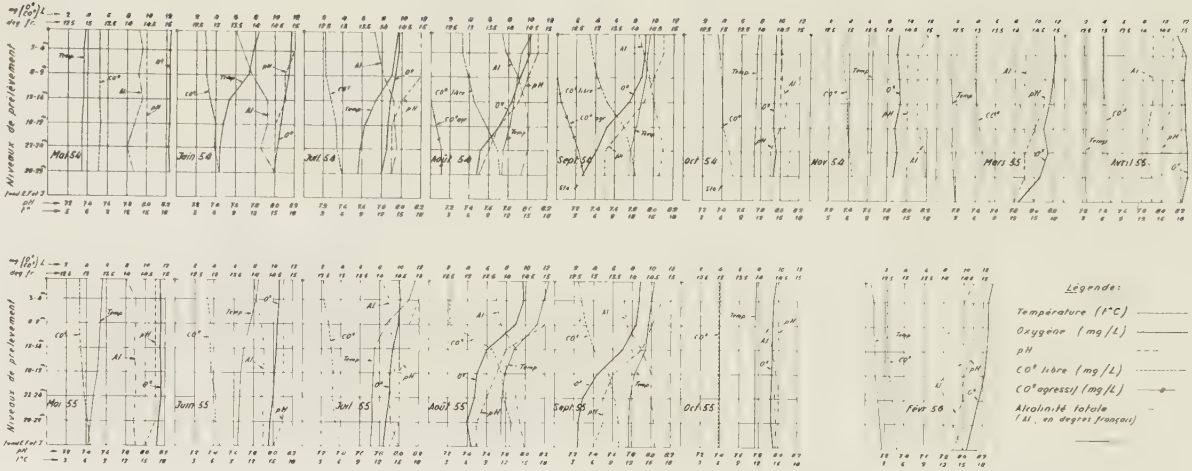


Figure 12
Variations de la température, de l'oxygène, du pH, du CO_2 libre, du CO_2 agressif pour $CaCO_3$, et de l'alcalinité, en fonction de la profondeur (moyennes mensuelles des mesures aux stations A–M, mai 1954 – février 1956).

lac de Joux étant essentiellement bicarbonatée calcique, donc propice au développement du plancton.

Les mêmes phénomènes d'appauvrissement graduel en oxygène et d'enrichissement en gaz carbonique des couches profondes, se répètent pendant la stagnation hivernale, avec une intensité moindre toutefois. Ils témoignent d'une surcharge en matières organiques, dont la production est disproportionnée par rapport à la quantité d'oxygène disponible.

A cet égard, l'évolution de l'*oxydabilité*, qui informe sur la teneur de l'eau en substances réductrices, est symptomatique (fig. 13). D'une manière générale, l'oxydabilité de l'eau du lac de Joux est comprise entre 8 et 9 mg $KMnO_4$/l. Une augmentation générale de cet indice apparaît liée à une prolifération du plancton et aux déchets biologiques accrus que ce développement entraîne. Par ailleurs, à une diminution du taux pondéral des matières organiques correspondent une solubilisation partielle de ces substances et, parallèlement, une augmentation de l'oxydabilité, en liaison avec l'évolution du plancton; en effet, règle générale les courbes de variation des matières organiques, exprimées par la perte à la calcination, sont opposées à celles de l'oxydabilité.

Aux stations de référence, les variations sont irrégulières, du reste pour la plupart des facteurs physico-chimiques, ce que montrent des graphiques en «dents de scie» soulignant le caractère irrégulier de la pollution due aux déversements d'égouts. Il en est de même pour les apports d'eaux usées qui se font par l'intermédiaire de deux des fossés de la tête du lac (fig. 2).

Une autre confirmation de cette accumulation de déchets organiques est donnée par l'évolution des facteurs suivants: *ammoniaque* apparaissant de façon temporaire dans la zone profonde, *nitrites* décelables dès que la masse de matières à transformer en nitrates devient trop grande (fig. 14).

Ces indices dénotent une défaillance du pouvoir auto-épurateur du lac, qui ne parvient plus à minéraliser au fur et à mesure les matières organiques mises en jeu.

Au sujet des variations des nitrites de 0 à 14 m, en septembre 1954, qui au premier abord paraissent contradictoires, il convient de préciser ce qui suit: les pointes observées alors sont dues à des valeurs exceptionnellement élevées enregistrées à la station J, à savoir 0,18 mg/l à 0 et 3 m, puis 0,15 mg/l à 8 et 13 m. En outre, après la hausse survenue en août, les concentrations en nitrites dans l'épilimnion demeurent en général stables, même à la station F, où les prélèvements ont été effectués le 21. 9. sitôt après la prise d'échantillons au point J. Il faut par conséquent admettre que les

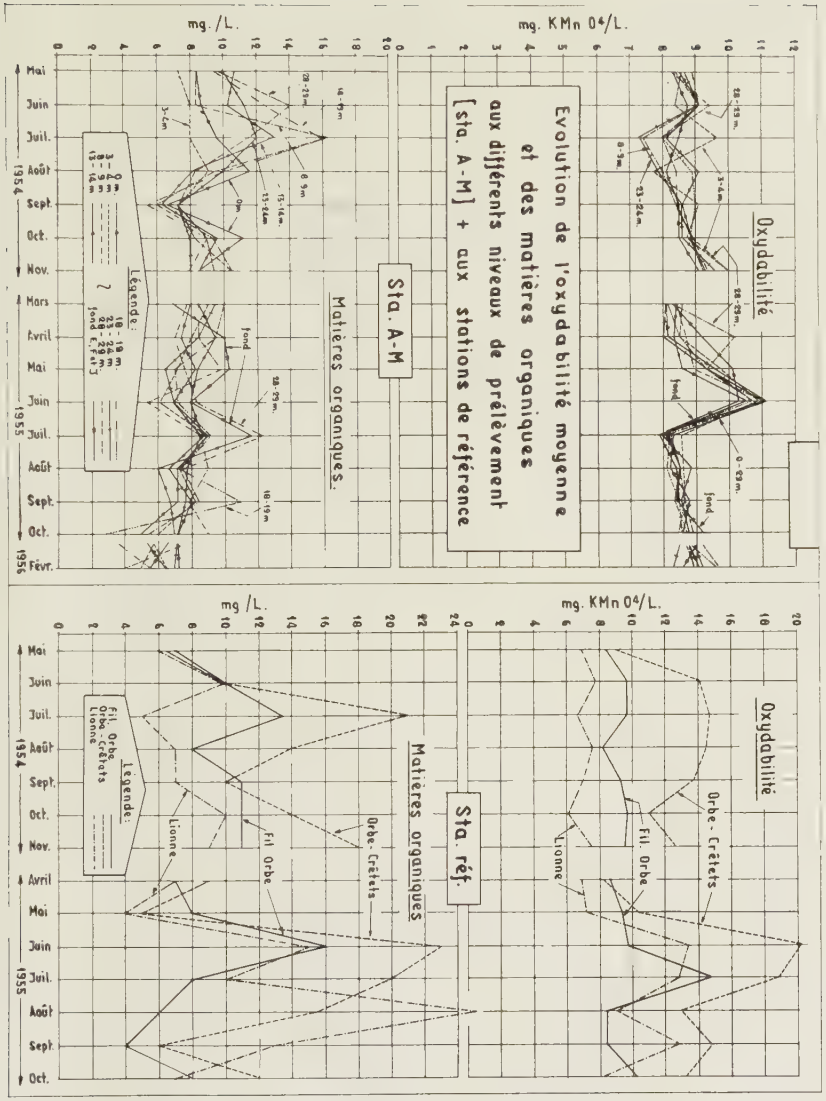

Evolution de l'oxydabilité moyenne
et des matières organiques
aux différents niveaux de prélèvement
[sta. A-M] + aux stations de référence
Oxydabilité
mg. KMn O4/L.
Matières organiques
mg./L.
Sta. A-M
Sta. réf.
Légende:
Fil Orbe
Orbe-Crêtets
Lionne
Mai
Juin
Juil.
Août
Sept.
Oct.
Nov.
Mars
Avril
Mai
Juin
Juil.
Août
Sept.
Oct.
Févr.
1954
1955
1956

Figure 13

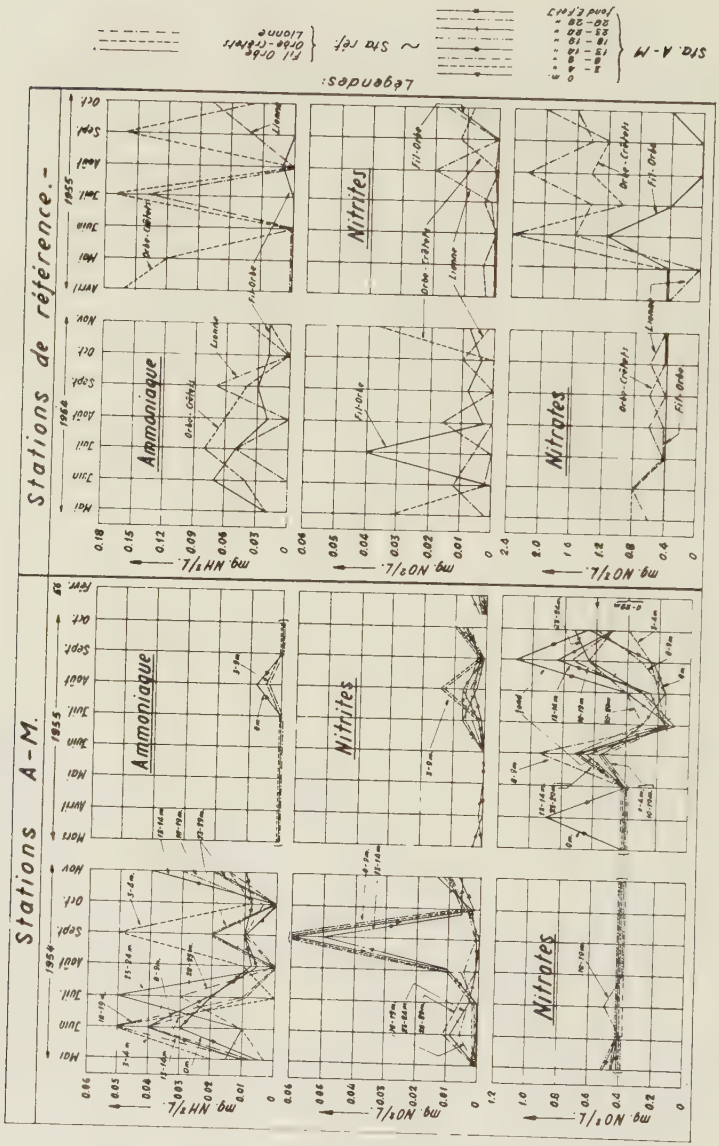


Figure 14
Evolution de l'ammoniaque, des nitrites et nitrates, aux différents niveaux de prélèvement (moyennes mensuelles, stations A–M) et aux stations de référence.

très fortes teneurs en nitrites mesurées à cette dernière station résultent d'un apport particulièrement polluant de la Lionne, grâce à l'intervention d'un vent du secteur Sud soufflant en rafales. Du fait des conditions de stratification thermique, cet apport dans le secteur considéré n'a pu affecter que l'épilimnion. Précisons encore que dans la Lionne, les prélèvements ont été faits le 22. 9.

Dans l'Orbe et la Lionne, les taux d'ammoniaque et de nitrites sont sujets à de fortes fluctuations; celles de l'ammoniaque sont bien marquées, surtout en 1955. Dans l'Orbe et le Fil de l'Orbe, s'il y a une certaine concordance entre les courbes de variation de l'oxydabilité et des matières organiques, ce n'est pas le cas pour l'ammoniaque et les nitrites, qui sont des éléments labiles. Mais cette grande irrégularité d'allure tient surtout aux conditions de dilution des eaux usées déversées par l'intermédiaire de l'Orbe et des deux canaux prémentionnés de la tête du lac (fig. 2).

Enfin, l'évolution des nitrates et des phosphates, dont l'abondance conditionne la production végétale et, partant, celle d'oxygène, est significative. En 1954, les *nitrates* sont pratiquement constants, avec une valeur moyenne de 0,4 mg NO_3/l, les apports par l'Orbe et la Lionne étant demeurés relativement stables, avec des concentrations oscillant entre 0,4 et 0,8 mg/l (fig. 14). Par contre, en 1955 ils présentent des variations bien marquées, les apports des deux affluents étant alors importants, en général supérieurs à 1,2 mg/l. Répartis dans toute la masse des eaux par la circulation vernale, les nitrates accusent une forte et brusque diminution à la fin de la poussée vernale considérable du phytoplancton, cette baisse étant consécutive à une intense assimilation par les algues de ce facteur essentiel de croissance. Puis la décomposition des déchets provenant du plancton mort, pendant la stagnation estivale, libère graduellement des matières azotées dont la minéralisation se traduit par la mise en jeu dans l'hypolimnion de nouvelles quantités de nitrates, lesquels sont redistribués dans toute la masse des eaux par la circulation automnale.

De même, le *phosphore* se comporte comme un facteur limitant, alors même que les teneurs en *phosphates dissous* sont toujours égales ou inférieures à 20 γ/l (ou 20 millièmes de mg/l). Les courbes de la fig. 15 illustrent clairement le phénomène du stockage de cet élément par le phytoplancton, les algues pouvant l'accumuler dans leurs tissus au delà des besoins du moment. Cette immobilisation du phosphore assimilable, entraînant une limitation de la croissance du plancton, s'observe en mai 1954 et surtout en juin 1955. Chaque fois, cette fixation active correspond à une prolifération abondante du plancton; elle est suivie d'une phase de dépression,

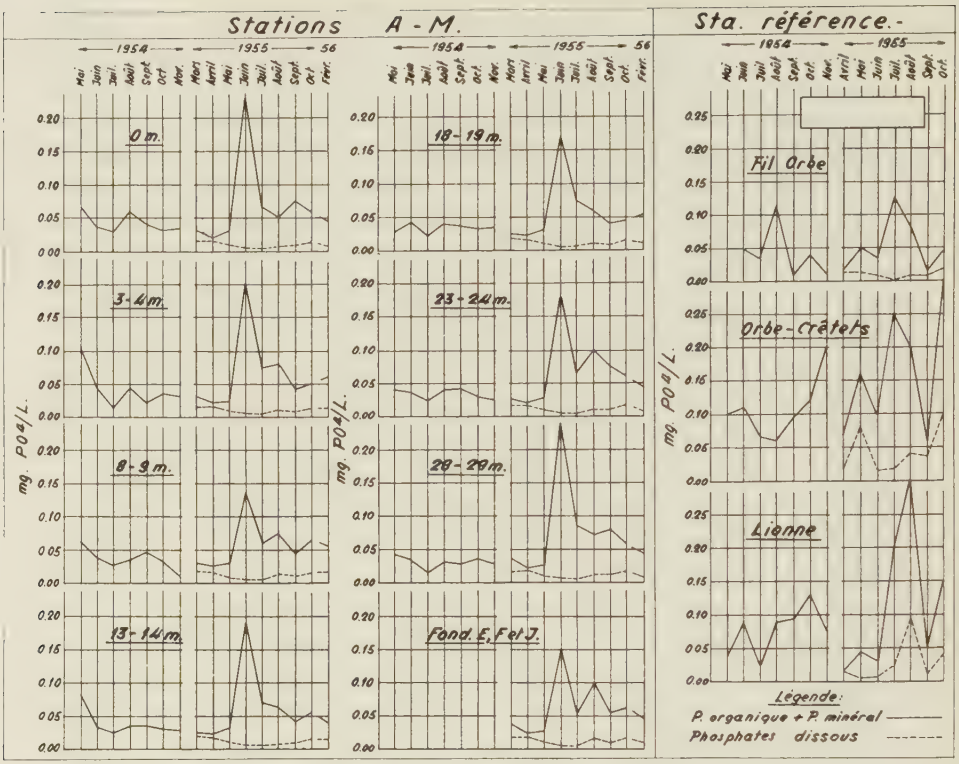


Figure 15
Evolution du phosphore total (P. org. + P. min.) et des phosphates dissous, aux différents niveaux de prélèvement (moyennes mensuelles, stations A–M) et aux stations de référence.

qui se traduit par un ralentissement, puis un arrêt dans la production algale. Nous commenterons plus loin les variations du plancton.

Quant aux variations observées aux stations de référence, elles sont irrégulières, pour les raisons déjà mentionnées à propos des variations de l'oxydabilité, de l'ammoniaque et des nitrites, aussi bien dans l'Orbe que dans la Lionne. Il importe de souligner le fait que les apports de ces affluents, ainsi que des deux canaux d'égouts de la tête du lac, se traduisent par des teneurs souvent élevées en phosphates dissous (0,080–0,100 mg PO_4/l). Dans les canaux prémentionnés, étant donné la dilution plus faible des égouts et, partant, la charge polluante plus considérable, des concentrations de 1,0–2,4 mg PO_4/l ont été mesurées.

Rappelons enfin que, d'une manière générale, la transparence de l'eau

est faible pendant la période de végétation et la couleur toujours vert-jaune. Ces indices témoignent de la prospérité du plancton et de l'abondance des matières en suspension.

La confrontation des courbes de variation des principaux facteurs physico-chimiques des eaux du lac de Joux fait ressortir que pendant la stagnation estivale, une *stratification chimique* tend à s'établir au sein de la masse des eaux, présentant quelque parallélisme avec la stratification thermique. Elle intéresse les facteurs suivants: oxygène, gaz carbonique libre, pH, conductivité, duretés totale et passagère, nitrates et phosphates. Relevons encore qu'il existe un parallélisme net entre la conductivité et la dureté totale; aux stations de référence, cette analogie est même frappante.

Du point de vue de la dureté, l'eau du lac de Joux est *moyennement dure*, selon l'échelle de KLUT. Sa minéralisation demeure d'une manière générale assez constante (valeurs moyennes des résidus sec et calciné: 158,5 et 149,5 mg/l). La dureté totale oscille entre 14,5 et 15,3 degrés français, alors que la dureté passagère varie de 14,0 à 14,8 degrés (aux stations de référence, les valeurs moyennes des deux duretés sont les suivantes: 19,0 et 18,4 degrés pour l'Orbe, pont des Crêtets; 15,2 et 14,6 degrés au Fil de l'Orbe; 19,2 et 18,6 degrés pour la Lionne).

Par ailleurs, les teneurs en sulfates, chlorures et nitrates, enfin en fer, sont faibles. Elles rendent bien compte de la faible dureté permanente et du caractère essentiellement bicarbonaté calcique de cette eau.

En conséquence, le lac de Joux est un lac de *type carbonaté* (calcaire). Cette constatation ne saurait nous étonner, puisque le bassin d'alimentation se trouve en pays calcaire.

VII. Qualités bactériologiques des eaux

Du point de vue hygiénique, les nombreux contrôles effectués pour l'eau du lac de Joux témoignent d'une nette pollution bactérienne. L'appréciation de l'état bactériologique de ce bassin est fondée sur les critères suivants: richesse microbienne et proportion de coliformes, germes-tests dont la recherche et l'identification ont été effectuées à l'aide des épreuves indiquées dans le tableau 3.

Il faut ici rappeler que la tendance actuelle est de considérer tous les germes du groupe des *Coliformes*, quels qu'ils soient, comme étrangers à l'eau et, partant, comme indicateurs d'une pollution d'origine fécale,

Tableau 3

Identification des Coliformes, basée sur les tests IMVIC et le milieu de diagnostic de KLIGLER, d'après BRISOU, «Entérobactéries pathogènes», et BUTTIAUX, «L'analyse bactériologique des eaux de consommation»

Lactose	Glucose	Mobilité	Indol I	Rouge de méthyle M	Acétyl-méthyl-carbinol V	Citrate de sodium IC	H_2S	Genres et espèces	Habitats possibles
+ g	+ g	+ ou ○	+	+	○	○	○	*Esch. coli* type I	Type courant de la flore intestinale
+ g	+ g	+ ou ○	○	+	○	○	○	*Esch. coli* type II	Egalement d'origine fécale
+ g	+ g	+ ou ○	○	+	○	+	○	*Esch. intermedium*	Sol et eaux d'égouts
+ g	+ g	+ ou ○	+	+	○	+	○	*Esch. intermedium* atypique	Fréquent dans le sol et les eaux d'égouts
+ g	+ g	+ ou ○	+	+	+	+	○	Esch. intermédiaires, formes mixtes	Sol et eaux d'égouts
+ g	+ g	+ ou ○	+	○	○	+	○		Idem
+ g	+ g	+ ou ○	+ ou ○	+	○	+	+	*Esch. freundii*	Idem
+ g	+ g	○	+ ou ○	○	+	+	○ ou + (rare)	*Aer. cloacae*	Idem
+ g	+ g	○	○ ou +	○ ou +	+	+	○	*Aer. aerogenes*	Fréquent dans le sol et les eaux d'égouts
+ g	+ g	○	○	○	+	+	○	*Aer. aerogenes* atypique	Fréquent dans la flore des eaux d'égouts
+ ou ○ (lent)	+ g	+ ou ○	+ ou ○	+	○ ou +	+ ou ○	○ ou +	Paracoli (-colons)	Sol et eaux d'égouts

+ g: fermentation avec gaz

récente ou plus lointaine. Les normes internationales applicables à l'eau de boisson[1]) sont formulées dans ce sens.

Les Coliformes que l'on peut trouver dans l'eau appartiennent à l'une ou l'autre des espèces suivantes: *Escherichia coli*, type I et type II; Escherichia intermédiaires, englobant *Esch. intermedium* et *Esch. freundii*; *Aerobacter*, réunissant *Aer. cloacae* et *Aer. aerogenes*. A côté des espèces typiques se rencontrent des formes atypiques ou mixtes, notamment les *Paracolibacilles* (Paracolons). Ces derniers, parfois nommés «Coliformes aberrants», présentent eux aussi un intérêt épidémiologique certain; ils se rencontrent assez souvent dans les matières fécales et, comme les Esch. intermédiaires et *Aerobacter*, sont beaucoup plus résistants aux agents extérieurs qu'*Escherichia coli*; par conséquent, ils peuvent être le témoin de contaminations fécales anciennes.

Le tableau 3 est schématique. Nous insistons sur ce point, d'autant plus qu'il est parfois difficile de classer une espèce, si ce n'est comme forme atypique ou mixte. Précisons encore que les souches de Paracoli isolées ont été identifiées de façon nette, diverses modifications ayant été apportées à la méthode standard appliquée, afin de permettre leur dépistage. On consultera à ce sujet le travail original.

Dans la région pélagique, qui correspond à la portion du lac comprise entre la surface, la zone littorale et la zone profonde, la *teneur microbienne* est d'une manière générale assez faible, le nombre de germes étant, règle générale, plus élevé dans les couches superficielles qu'en profondeur (fig. 16). Sur les 919 échantillons prélevés au cours des 19 mois d'observations systématiques, 75,5% renfermaient moins de 100 germes par ml après 5 jours d'incubation à 20–22 °C, 12,6% de 100 à 200 germes, environ 10% de 200 à 500 germes, et moins de 2% de 500 à 2000 germes. Les cultures de 10 jours fournissent des chiffres en moyenne de 30% supérieurs.

Il n'est pas douteux que la décantation et la forte dilution des divers apports polluants au sein de la masse lacustre contribuent dans une large mesure à l'épuration bactérienne des eaux. En effet, malgré la souillure de l'Orbe et de la Lionne, pollution sujette à de fortes variations, le nombre de germes diminue considérablement avec la profondeur; au Fil de l'Orbe déjà, la quantité de germes est en moyenne de 300–400 par ml (fig. 17). Par ailleurs, les conditions topographiques jouent un rôle favorable, les nombreuses parties rocheuses sur la rive occidentale réduisant les risques de pollution, qui, rappelons le, sont concentrés surtout aux deux extrémités du lac.

[1]) Organisation mondiale de la santé (Genève 1958).

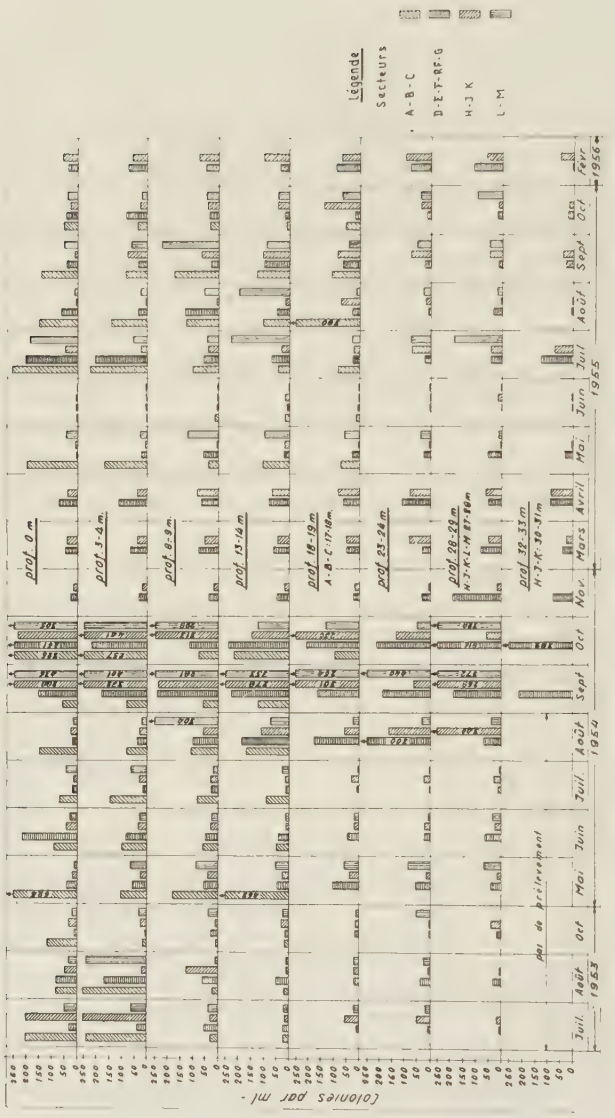


Figure 16
Germes par ml (nombres moyens), 5 j. 20–22 °C.

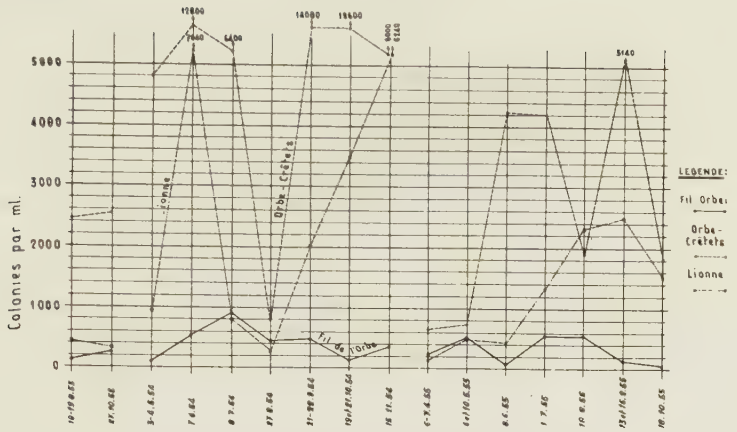


Figure 17
Germes par ml, 5 j. 20–22 °C, aux stations de référence.

Dans le lac Brenet, les teneurs en germes avoisinent en général celles enregistrées à la station M.

Si les pluies et les vents généraux, notamment le vent du S.-W., influent parfois sur la pollution bactérienne du lac de Joux, cette contamination résulte avant tout des multiples déversements d'eaux usées.

En effet, les *bactéries des groupes Coliformes et Paracolons*, témoins d'une contamination d'origine fécale, se rencontrent dans l'eau de ce lac avec une fréquence souvent insolite. Durant la période juillet 1953 – février 1956, la présence de ces bacilles – dans une quantité d'eau égale ou inférieure à 20 ml – a été décelée dans le 27% des cas. A la fin de l'été, ces bacilles deviennent abondants et envahissent presque toutes les couches, même au centre du lac et au voisinage des fonds (fig. 18 et 19).

De plus, le *titre colimétrique* (nombre minimum de Coliformes présents dans un litre) est loin d'être faible. La richesse en Coliformes et Paracoli se répartit comme suit: plus de 50 coli par litre dans 8% des cas; plus de 200 coli/l dans 11% et plus de 1000 coli/l dans 8%.

Les résultats intéressant l'Orbe, le Fil de l'Orbe et la Lionne témoignent d'une forte souillure, dont on ne saurait s'étonner. L'origine fécale récente de cette contamination est indubitable, puisque les prises d'échantillons ont été faites immédiatement à l'aval des zones de concentration des égouts du Chenit et de L'Abbaye. A cet égard, l'identification des souches de Coliformes isolées en 1954/55 fournit des résultats fort intéressants:

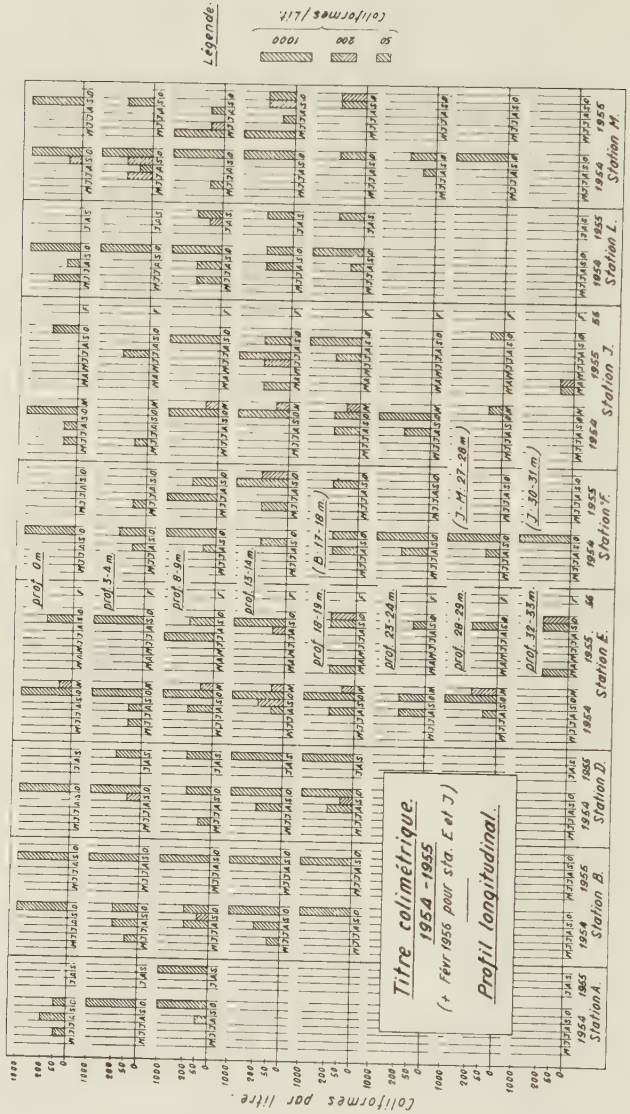

Légende
Coliformes/Litr.
50
200
1000
Titre colimétrique.
1954 - 1955
(+ Févr 1956 pour sta. E et J)
Profil longitudinal.
Coliformes par litre.
prof. 0 m
prof. 5 m
prof. 8 m
prof. 13 m
prof. 18 m
(8 - 12 - 18 m)
prof. 23 m
prof. 28 m
(7 - M - 27 - 28 m)
prof. 33 m
(7 - 30 - 31 m)
Station A.
Station B.
Station D.
Station E.
Station V.
Station J.
Station L.
Station M.
1954
1955
1956

Figure 18

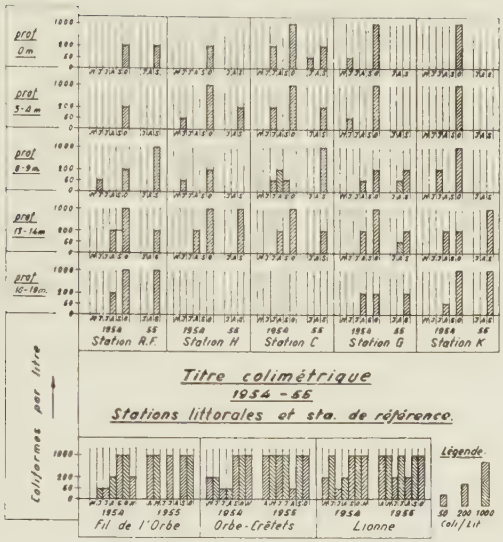


Figure 19

toutes les variétés de Coliformes, et non pas seulement *Escherichia coli*, types I et II, que certains bactériologistes-hydrologistes voudraient considérer comme seuls témoins d'une pollution fécale récente, se rencontrent dans ces zones de déversements d'égouts; en outre, toutes les souches isolées des eaux de l'Orbe et de la Lionne se retrouvent à toutes profondeurs dans le lac, même au voisinage de la côte rocheuse occidentale (tableau 4).

En ce qui concerne la présence éventuelle de Paracolons aux stations de référence, une explication est nécessaire. Des Coliformes ayant été mis en évidence dans presque tous les cas, la présence conjointe de Paracoli, masquée par celle des Coliformes, n'a été ni observée, ni recherchée. A cet effet, il aurait fallu procéder à des isolements assez laborieux.

En conclusion, l'état bactériologique du lac de Joux doit être considéré comme peu satisfaisant. La situation devient même inquiétante à la fin de l'été, lorsque les conditions météorologiques et thermiques sont propices au développement des Coliformes et Paracoli.

VIII. Composition et évolution du plancton pélagique. Pêches littorales de plancton

En opposition au *benthos*, qui groupe l'ensemble des organismes animaux et végétaux liés au fond de l'eau, pouvant être fixes ou mobiles, le *plancton*

Tableau 4

Souches de coliformes isolées en 1954 et 1955

	Stations d'observation A–M					Stations de référence Fil. Orbe, Orbe-Crêtets et Lionne				
	Ech. analysés	Coliformes	Paracoli	*E. coli* type I	*E. coli* type II	Ech. analysés	Coliformes	Paracoli	*E. coli* type I	*E. coli* type II
1954										
Mai	64	–	-	-	-	3	4		2	
Juin	65	16	–	6	-	3	3		1	-
Juil.	65	6	–	3		3	3		–	1
Août	67	49	–	5	15	3	3		-	
Sept.	69	11	–	6	1	3	4		–	
Oct.	70	26	39	2	1	3	3		–	
Nov.	14	9	–	–		3	3			–
Total:	414	117	39	22	17	21	23	–	3	1
en % des souches isolées*):		156		39 ↓ 25%			23		4 ↓ 17,4%	
1955										
Mars	15	3	1	2	-					
Avril	15	1	–	–		3	3		1	
Mai	35	2	–	1		3	3			
Juin	36	4	–	2		3	2		-	-
Juil.	72	7	–	5		3	5		-	
Août	71	5	–	3		3	2			
Sept.	71	33	13	1		3	4		1	
Oct.	35	7	–	1	1	3	3	-	–	
Total:	350	62	14	15	1	21	22		2	–
en % des souches isolées*):		76		16 ↓ 21%			22		2 ↓ 9%	

*) Coliformes et Paracoli

est constitué par l'ensemble des microorganismes tant animaux que végétaux, en suspension dans l'eau ou animés de mouvements limités.

Le but des recherches, essentiellement d'ordre hygiénique et technique, visant les variations saisonnières de la qualité de l'eau, n'impliquait pas une étude de détail de la systématique et de la morphologie des organismes.

Aussi, analysant qualitativement et quantitativement le *plancton total* (zoo- et phytoplancton) récolté par pompage, nous nous sommes borné à établir un inventaire des espèces, à en étudier la distribution mensuelle et les variations saisonnières, en relation avec les conditions physico-chimiques du milieu, afin de pouvoir mieux caractériser le type biologique du lac.

Les prises intéressant le profil E–J ont été effectuées systématiquement à 13 niveaux distincts. Vu le temps limité dont nous disposions sur place, toutes les récoltes ont été fixées au formol et conservées en collections, ce qui nous a permis de les examiner à loisir et de procéder au dénombrement des individus de chaque espèce.

La population planctonique du lac de Joux est caractérisée par un phytoplancton prédominant, assez varié en espèces et surtout riche en individus. On trouvera dans le travail original la liste détaillée des espèces pélagiques et de celles littorales, avec indication de leur fréquence relative. Les figures 20 à 24 donnent, pour les stations E et J, une image de la répartition des espèces essentielles, en fonction du temps et de la profondeur.

Sur les huitante espèces végétales et animales inventoriées, la plupart communes à la majorité de nos lacs, seules quatre sont dominantes ou se signalent par une abondance saisonnière particulière. Ce sont par ordre d'importance, les Diatomées *Asterionella formosa* et *Tabellaria fenestrata*, le Péridinien *Ceratium hirundinella*, enfin la Cyanophycée *Coelosphaerium Naegelianum*.

Les principales espèces compagnes, qui jouent un rôle secondaire, sont les Chrysophycées *Dinobryon divergens*, *D. sociale* var. *stipitatum* et *D. sertularia*, les Péridiniens *Peridinium cinctum* et *P. Willei*, enfin les Diatomées filiformes *Melosira italica*, *Fragilaria crotonensis* et *Synedra acus*.

Ces espèces essentielles sont toutes eupélagiques, *Melosira italica* et *Synedra acus* constituant elles aussi de véritables planctontes lacustres.

Le zooplancton comprend une trentaine d'espèces, en majorité des Rotateurs. Parmi ceux-ci, les espèces les plus fréquentes sont *Keratella cochlearis* et *Polyarthra vulgaris*, auxquels il faut associer *Asplanchna priodonta*, *Filinia longiseta* et *Notholca longispina*, formes également permanentes, bien que parfois rares. Ces Rotateurs sont tous strictement planctoniques.

Du point de vue quantitatif, le plancton du lac de Joux présente *deux maxima*, en mai/juin et en novembre, et passe par un *minimum* en août ou septembre, selon les fluctuations des conditions physico-chimiques du milieu. Pour plus de clarté, nous citerons quelques chiffres (tableau 5); il s'agit des moyennes mensuelles des déterminations du volume brut, de la teneur en cendres et du nombre global d'organismes présents dans l'eau, intéressant les stations E et J.

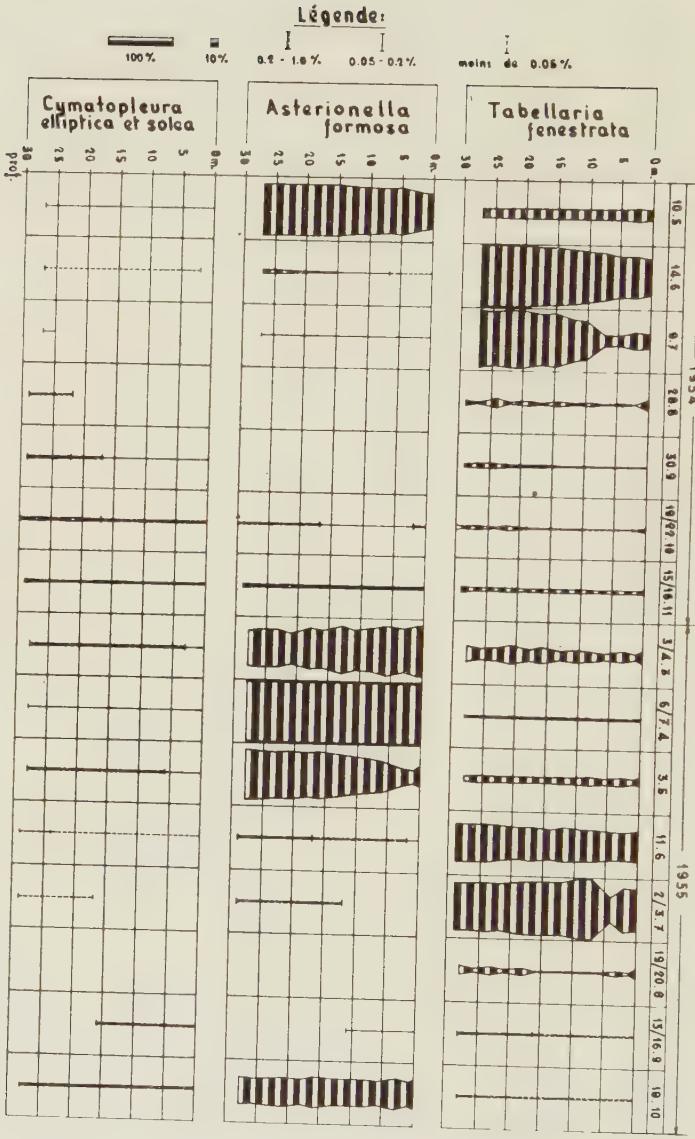


Figure 20
Variation verticale des Diatomées stelliformes et de *Cymatopleura*, profil E–J, 1954/55.

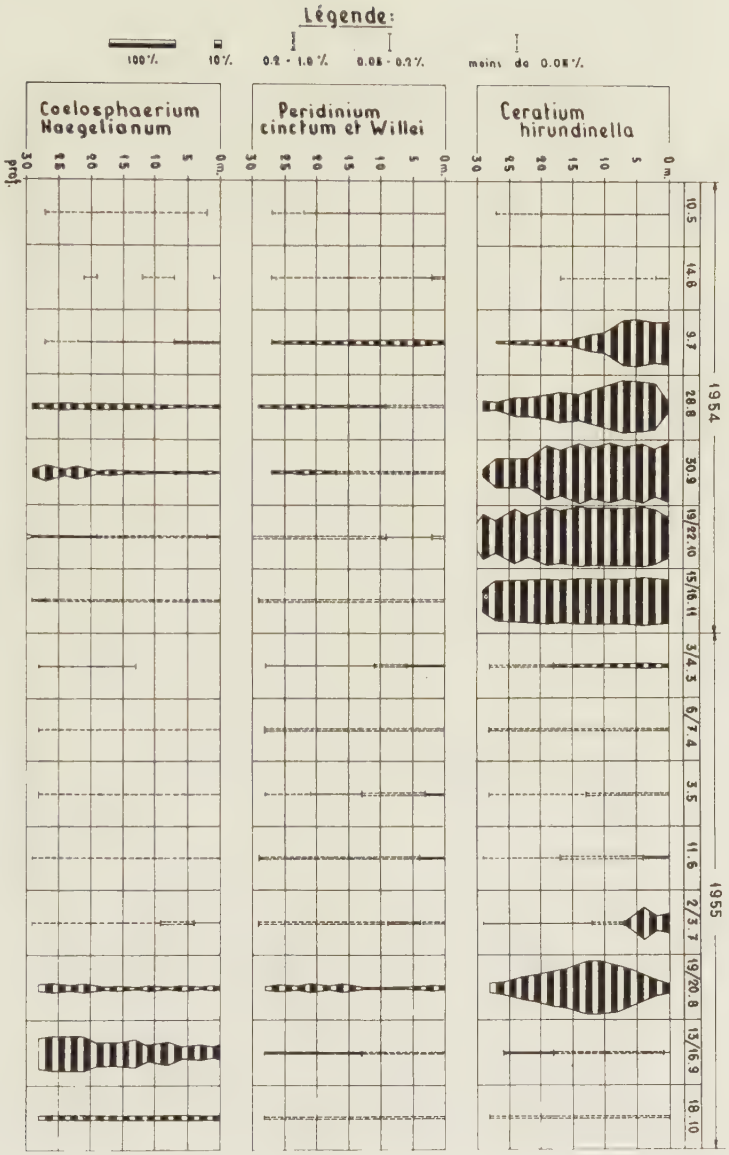


Figure 21
Variation verticale des Dinophycées et de la Cyanophycée *Coelosphaerium* Naegel., profil E–J, 1954/55.

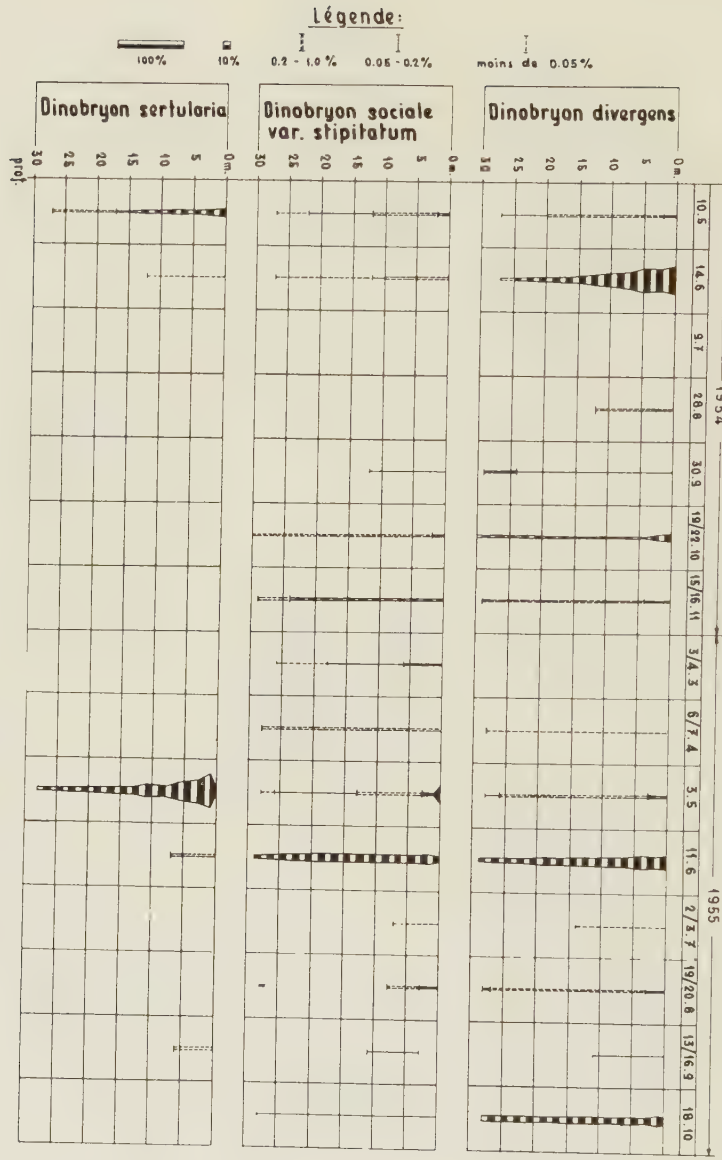


Figure 22
Variation verticale des Chrysophycées, profil E–J, 1954/55.

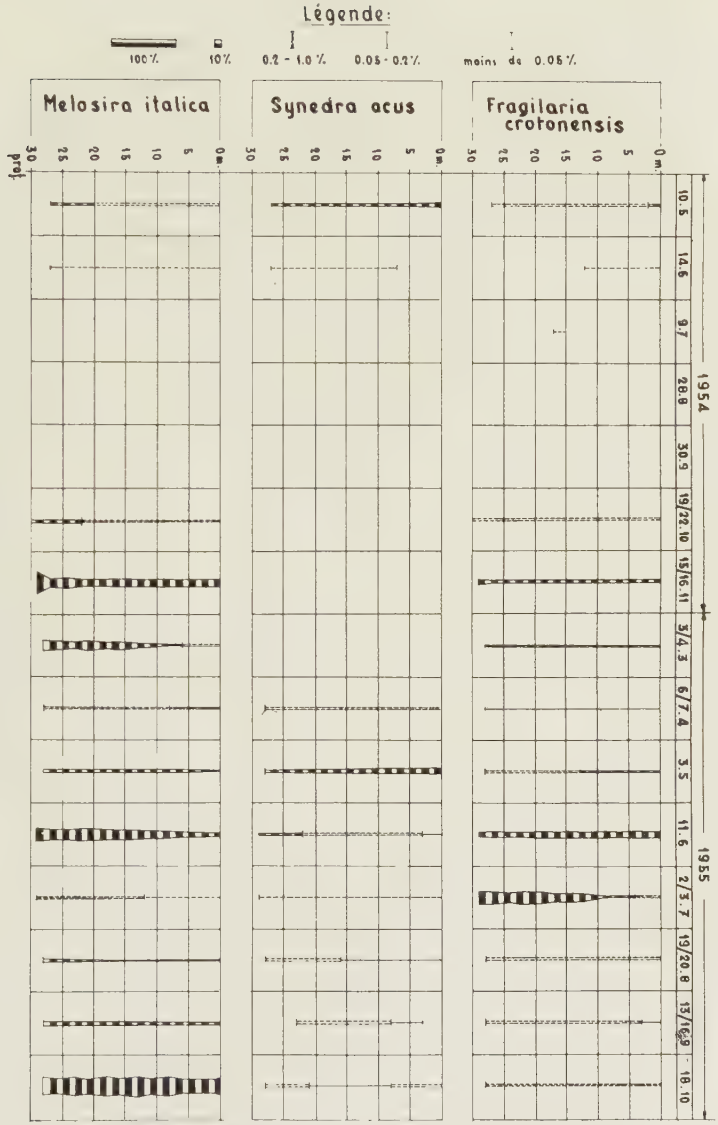


Figure 23
Variation verticale des Diatomées filiformes, profil E–J, 1954/55.

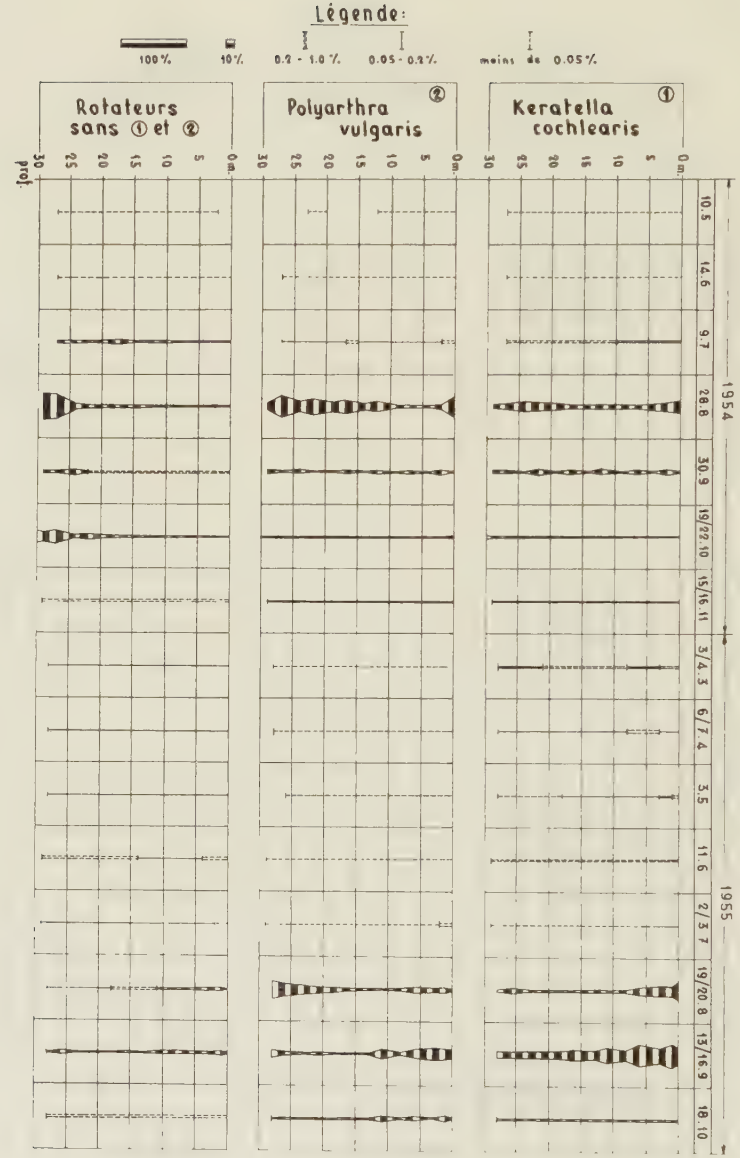


Figure 24
Variation verticale des Rotateurs, profil E–J, 1954/55.

Tableau 5

Distribution, volume brut, cendres et teneur en silice du plancton
Moyennes mensuelles du profil E–J, 1954 et 1955

1954	10. 5.	14. 6.	9. 7.	28. 8.	30. 9.	19./22. 10.	15./16. 11.	
Planctontes dans 1 l	254350	121946	2800	612	1361	2940	3564	
Volume brut ml/m³	33	40	9	2,5	4,5	4,5	5,5	
Cendres mg/m³	717	706	70	26,7	19,8	24,0	31,5	
1955	3./4. 3.	6./7. 4.	3. 5.	11. 6.	2./3. 7.	19./20. 8.	13./16. 9.	18. 10.
Planctontes dans 1 l	4136	40222	64664	35326	29654	1037	412	2566
Volume brut ml/m³	2,0	4,5	13,5	32,5	24,7	2,5	2,2	3,5
Cendres mg/m³	26,8	78	101,5	153	132,5	12,8	14,0	31,0
Silice %	–	56	67,4	85	74	21,1	6,0	16,7

Alors que le maximum d'automne est peu important, celui du printemps se traduit par une surabondance d'organismes dans les couches supérieures (fig. 25). Cette richesse d'un épilimnion suroxygéné est également mise en relief par les valeurs élevées du volume et des cendres du plancton (fig. 26 et 27).

L'élévation générale de la température en mai/juin et l'augmentation simultanée de l'insolation, tant en durée qu'en intensité, ne sont pas les seules causes d'une telle exubérance. La présence d'une quantité relativement grande de sels nutritifs azotés et phosphorés, libérés par les décompositions bactériennes de l'hiver, constitue le principal facteur responsable de cette production considérable de microplancton. Les données chimiques montrent, nous l'avons déjà relevé, que le milieu est particulièrement favorable à la prolifération d'organismes planctoniques.

D'une manière générale, la quantité de plancton diminue avec la profondeur, la majeure partie des forces planctoniques étant concentrée entre 3 et 5 m. Cette répartition verticale, notamment lors du plein épanouissement du plancton, peut être perturbée par la circulation générale des eaux et par les courants de retour engendrés par les vents dominants (bise et vent du S.-W.).

Comme producteur de matière organisée microscopique, tant végétale

qu'animale, le lac de Joux rentre dans la catégorie des lacs de *forte productivité*. Cette prospérité est mise en évidence surtout par la densité élevée du plancton dans les couches supérieures, à la fin du printemps et au début de l'été.

Si cette richesse relative en plancton nutritif est peut-être avantageuse pour le rendement de certaines pêches, elle trahit néanmoins l'eutrophisation du lac sérieusement amorcée.

Parmi les composants du plancton, le groupe des *Diatomées* occupe la première place dans le total annuel (fig. 28) et présente deux maxima, le premier et le plus massif ayant lieu au printemps (mars juin), voire encore au début de juillet, le second en automne (octobre novembre). Le minimum des Diatomées coïncide avec le minimum estival du plancton (août septembre).

Les *Dinophycées* (*Péridiniens*) jouent un rôle important durant l'éte et l'automne 1954, par suite de l'expansion considérable de *Ceratium hirundinella*. Leur influence est par contre modeste en 1955, sauf pendant le mois d'août où *Ceratium* prend un grand développement, pour diminuer brusquement en septembre.

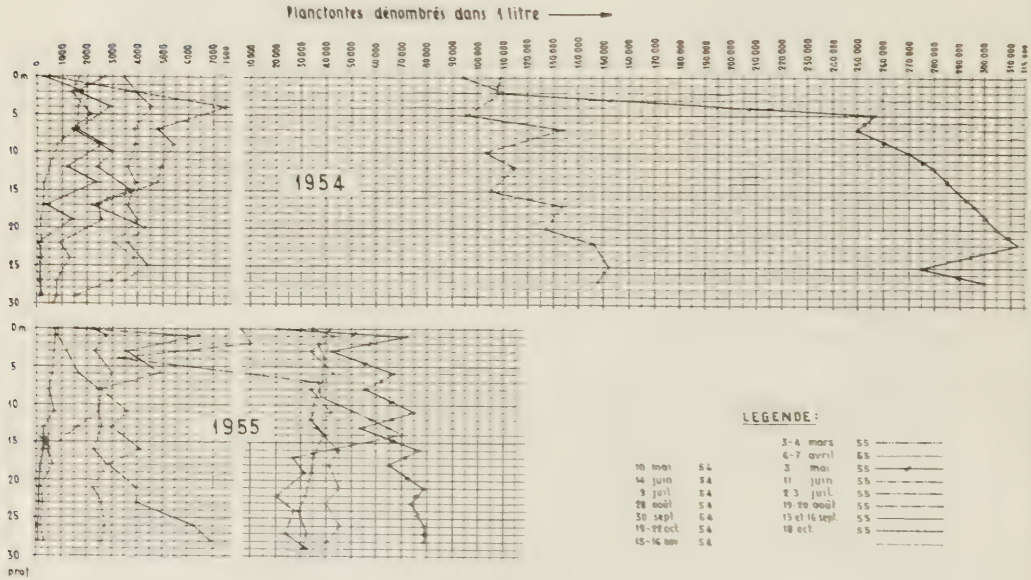


Figure 25
Distribution verticale du plancton: Planctontes dénombrés dans 1 litre aux différents niveaux du profil E–J.

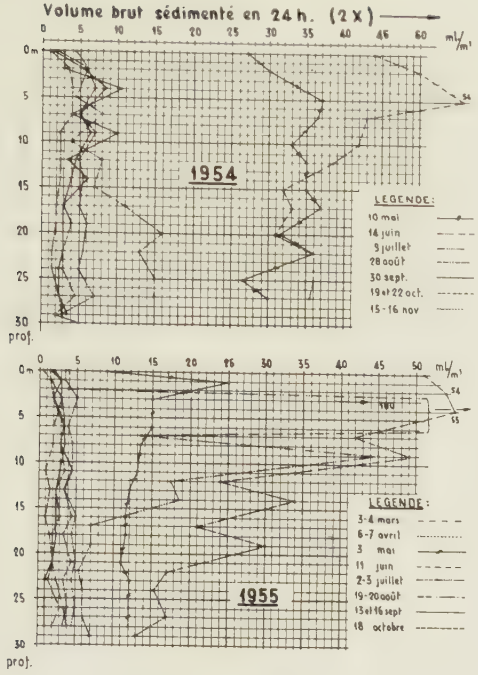


Figure 26
Volume brut du plancton en ml/m³, aux différents niveaux du profil E–J.

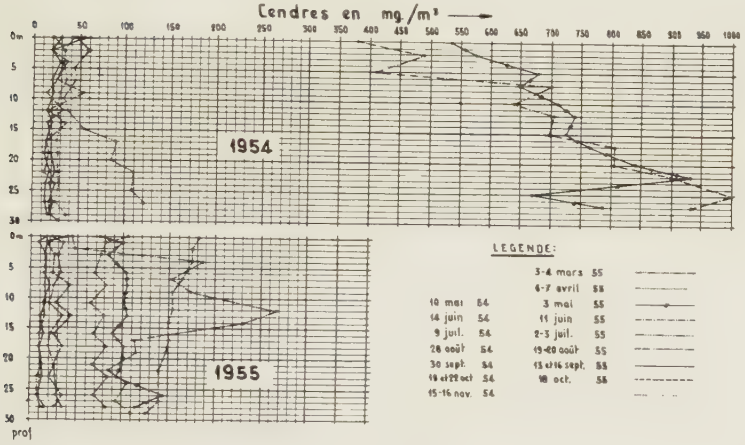


Figure 27
Cendres du plancton en mg/m³, aux différents niveaux du profil E–J.

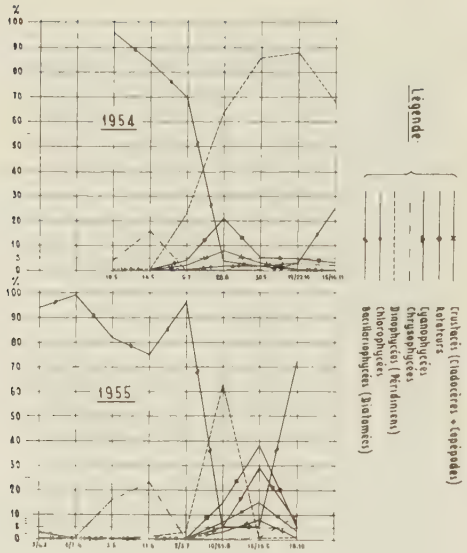


Figure 28
Fréquence mensuelle des principaux groupes planctoniques en % du total des individus dénombrés aux stations E et J.

Les *Chrysophycées* présentent chaque année deux maxima, en mai juin et en octobre, le premier bien marqué, le second peu accentué.

D'une manière générale très peu abondantes ou même rares, les *Cyanophycées* et les *Chlorophycées* s'épanouissent en août et septembre, établissant ainsi leur maximum pendant le minimum estival du plancton. Les premières sont alors un peu plus abondantes que les secondes. Quant aux *Conjuguées*, jamais foisonnantes, elles aussi ont leur expansion limitée à ces deux mois.

Dans le zooplancton, les *Rotateurs* l'emportent sur les *Crustacés* (*Cladocères* et *Copépodes*). Avec les Crustacés, ils acquièrent leur développement maximum en été et deviennent abondants. Parvenus assez rapidement à leur apogée, en août/septembre, les deux groupes d'organismes reculent plus ou moins brusquement un mois après.

Enfin, les *Protozoaires* ne jouent guère de rôle dans le plancton du lac de Joux.

D'une année à l'autre, les *peuplements planctoniques* paraissent présenter une certaine homogénéité. La plupart des espèces essentielles observées en 1954 se retrouvent l'année suivante à la même époque. Mais il existe

des différences quantitatives et même quelques décalages, que l'on pourrait attribuer aux saisons plus ou moins précoces ou tardives. Les phénomènes météorologiques ne sont toutefois pas les seuls facteurs qui régissent l'évolution des divers organismes, bien que leur influence soit forte sur la masse relativement peu profonde du lac de Joux.

On peut néanmoins constater que, si la composition du plancton pélagique est très variable dans le cours de l'année, celle saisonnière paraît dans l'ensemble plutôt homogène, sous réserve de vérifications ultérieures.

Le *cycle évolutif des associations planctoniques* comprend quatre périodes correspondant à l'expansion maximum des espèces dominantes: *Asterionella formosa*, au début du printemps; *Tabellaria fenestrata*, à la fin du printemps et au début de l'été; *Ceratium hirundinella* et *Coelosphaerium Naegelianum*, pendant l'été; enfin, à nouveau *Asterionella formosa*, en automne.

Du point de vue qualitatif, la composition du *plancton littoral* est pratiquement la même que celle du plancton pélagique.

De ces constatations, il ressort que le lac de Joux est essentiellement un *lac à Diatomées stelliformes, types Asterionella formosa et Tabellaria fenestrata.*

La prédominance de ces espèces-clefs, la présence dans l'hypolimnion et dans la faune profonde de la larve du Culicidé *Corethra plumicornis*, toutes absentes à la fin du siècle dernier, sont des signes caractéristiques de l'eutrophisation du lac. Rappelons ici que l'invasion, à la même époque, du lac de Zurich par *Tabellaria fenestrata* a coïncidé avec le début de sa pollution.

En ce qui concerne le lac Brenet, où seules quelques pêches verticales au filet fin ont été faites pour un inventaire des espèces, le nombre insuffisant des points de prélèvement, la durée réduite des observations et surtout l'absence de données numériques, ne permettent pas de tirer des conclusions valables. Signalons que la plupart des organismes recensés dans le plancton du lac de Joux ont été trouvés dans les récoltes à la station Br.

IX. Caractères chimiques et biologiques des sédiments

D'autres éléments témoignent de l'eutrophisation du lac de Joux, notamment les caractères chimiques et faunistiques des sédiments.

Le but principal de nos recherches étant l'étude de la pollution du lac, nous nous sommes intéressé avant tout à l'*état actuel du fond*, examinant à cet effet la composition chimique de la portion superficielle des dépôts et les transformations que subissent les principaux constituants, en liaison avec les variations saisonnières des facteurs physico-chimiques de l'eau surnageante. Conjointement, nous avons analysé la répartition des matières

organiques à deux niveaux différents d'un même sédiment, de manière à pouvoir juger de leur évolution au sein des dépôts.

En ce qui concerne la macrofaune benthique, les « sondages» effectués ne permettent d'en donner qu'un aperçu. Les observations recueillies, notamment au sujet des espèces dominantes fonctionnant comme indicateurs de pollution ou de pureté, autorisent cependant quelques conclusions intéressantes quant au degré de contamination du lac de Joux.

Notons tout d'abord que le sol lacustre est formé d'un limon remarquable par sa richesse en carbonate de chaux et par sa pauvreté en silice, à quelques exceptions près.

Dans la *zone profonde*, les sédiments contiennent en moyenne 77,5% de $CaCO_3$ et 8,5% de SiO_2. Relativement homogènes et impalpables, ils présentent une teinte foncée, gris-beige à la station B, gris-bleuté à gris-ardoise aux stations E, J et M (fig. 29).

Du printemps à la fin de l'été, le *pH de l'eau incluse* accuse une baisse importante; compris entre 7,6 et 7,9 au début de mai 1955, il tombe à 7,2–7,4 au cours de la phase de stagnation estivale. Cette constatation confirme ce que l'analyse chimique de l'eau avait déjà mis en évidence. Bien que sa réaction soit alors encore faiblement alcaline, la zone profonde tend à devenir acide pendant la période critique considérée, en raison des fermentations bactériennes anaérobies dont les boues sont le siège du fait de la forte production de matières organiques.

Parallèlement, les teneurs élevées en *sulfures* mises en jeu par les processus de putréfaction diminuent dans une mesure considérable, contribuant à la désoxygénation des eaux profondes au cours de la stagnation estivale. Les taux enregistrés en 1955 sont respectivement de... mg H_2S par 100 g (valeurs rapportées à la substance sèche):

	début mai	mi-septembre
B	210	31
E	154	9,6
J	99	0
M	590	40

A ce propos, relevons que dans la seconde moitié de septembre, aussi bien en 1954 qu'en 1955, le taux de saturation en oxygène de l'eau surnageante à la station M, à 4 m du fond, est inférieur à 28%; à 50 cm du fond, il n'atteint plus que 1% en 1954, 18% l'année suivante.

L'hydrogène sulfuré des sédiments (H_2S libre et combiné) ne provient guère de la transformation fermentaire de sulfates naturels, vu que l'eau du

Figure 29. Boues draguées les 13 et 16.9.55 aux stations Fil. Orbe, B, E, J et M.

lac de Joux n'en renferme que de faibles quantités. Il s'agit essentiellement de sulfures formés par la décomposition anaérobie de matières organiques.

D'une manière générale, la proportion de *matières organiques* est assez élevée, en moyenne de 7,4% dans la couche superficielle prélevée jusqu'à une profondeur de 4 cm environ. Vu que la densité des substances organiques est beaucoup plus faible que celle des matériaux inorganiques, leur importance en volume dans le sédiment est assez considérable.

Les couches sous-jacentes sont plus riches. L'étude de la répartition des matières organiques à deux niveaux différents d'un même sédiment, à l'aide de carottes de sondage (fig. 30), montre que la teneur d'une tranche de 5 cm prélevée à 15 cm de la surface est une fois et demie et même deux fois supérieure à celle de la portion superficielle de même épaisseur. Par conséquent, depuis plusieurs années déjà le lac de Joux n'est plus en mesure de « digérer », en fait minéraliser convenablement, au fur et à mesure, la totalité des matières organiques produites ou introduites dans ses eaux. D'où le faciès nettement vaseux des boues du fond.

Une autre confirmation de cette surcharge en matières organiques est donnée par l'évolution de l'*azote organique* des sédiments, dont les concentrations accusent du printemps à la fin de l'été une importante augmentation, témoin de la forte production du lac en plancton. Les teneurs dosées en 1955 sont de... mg N par 100 g de sédiment sec:

	début mai	mi-septembre
B	63	426
E	70	489
J	62,5	406
M	46	355

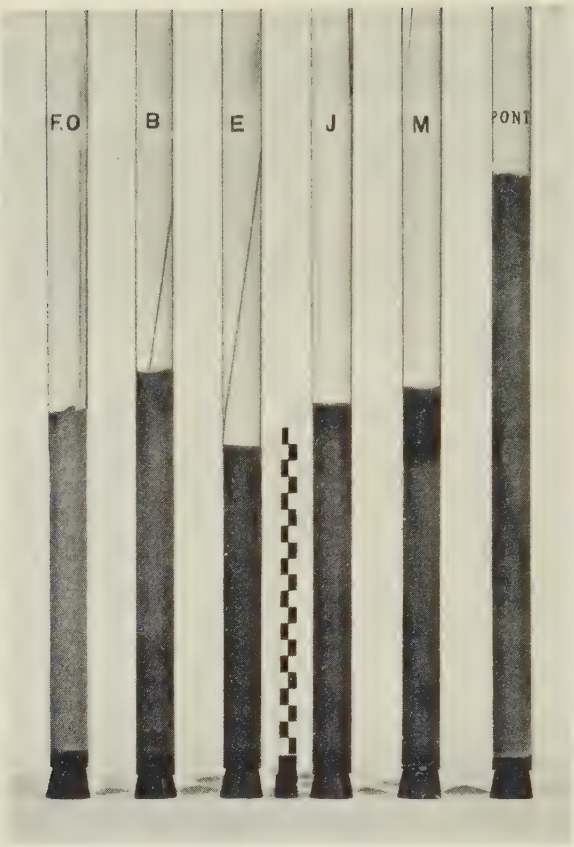


Figure 30
Carottes prélevées le 19.9.56 dans le profil longitudinal du lac.

Dans la *zone littorale*, plus exactement sur la beine où des draguages ont été effectués en divers points, les sédiments sont le plus souvent à l'état de *craie lacustre*, avec une teneur moyenne en $CaCO_3$ de 90% (81–82% dans le Fil de l'Orbe). Il s'agit de dépôts peu consistants, d'aspect grenu et de teinte variable, le plus souvent gris-beige, contenant une petite quantité de sable fin. En général pauvres en matières organiques, étant donné que la beine est fréquemment affectée par des courants, ils peuvent cependant, dans les endroits influencés par de nombreux déversements d'égouts, renfermer une quantité notable de ces substances; tel est notamment le cas devant le village du Pont.

Par ailleurs, à l'extrémité septentrionale du lac et dans le secteur L'Ab-

baye–Le Pont, les sédiments littoraux contiennent une proportion assez forte de silice (17–19%), provenant en majeure partie des terrains morainiques dominants.

Du point de vue faunistique, la zone profonde est faiblement peuplée en individus et en espèces. Cette faune profonde paraît assez homogène. En revanche, la population animale de la beine, plus riche en individus et en espèces, peut beaucoup varier au point de vue densité, d'une localité à l'autre. Règle générale, les fonds vaseux sont davantage habités que les sols sableux.

Comme pour le plancton et la végétation littorale, nous n'entrerons pas dans le détail des espèces inventoriées. Les organismes les plus fréquents sont: larves de Chironomidés, des genres *Chironomus* et surtout *Tanytarsus*; larve du Culicidé *Corethra plumicornis* (*Chaoborus crystallinus*), habitant la zone profonde et absente à la fin du siècle dernier; larves de *Caenis horaria* et *Sialis Latreille*, dans la zone littorale; Vers Tubificides *Limnodrilus hoffmeisteri* et *Tubifex barbatus*, Nématode *Ironus ignavus*; Mollusques *Valvata piscinalis*, *Valvata cristata*, *Pisidium* sp., *Sphaerium corneum* et *Musculium lacustre*, les deux dernières espèces vivant surtout dans la zone éprofonde (ou sublittorale); Bryozoaire *Paludicella Ehrenbergii*, dans la zone profonde.

Par leurs associations, les espèces dominantes caractérisent un milieu moyennement pollué. Du point de vue benthique profond, notamment, la présence constante de l'association des larves *Chironomus*, *Tanytarsus* et des Tubificidés *Limnodrilus hoffmeisteri* et *Tubifex barbatus*, de même que l'évolution des principaux facteurs physico-chimiques des sédiments (pH de l'eau incluse, hydrogène sulfuré et azote organique), enfin la couleur de ces dépôts et la richesse de leurs réserves en matières organiques, témoignent du caractère eutrophe du sol lacustre.

L'étude de la sédimentation lacustre, selon la technique de Thomas, permet d'estimer à environ 7 mm l'épaisseur moyenne du *dépôt annuel de vase formé dans la région profonde* (sédiment de la dernière année). Les données fournies par l'analyse chimique et biologique, d'une part du dépôt de vase, d'autre part de l'eau surnageante, confirment dans l'ensemble les observations faites sur l'évolution des principaux facteurs physico-chimiques des sédiments et des eaux, ainsi que sur les variations de composition du phytoplancton. A noter que presque toutes les espèces végétales recensées en 1954/55 dans le plancton pélagique ont été retrouvées dans le matériel recueilli sur le fond de la cuvette centrale du lac, dès fin avril 1956 jusqu'au début de mai 1957.

X. Végétation littorale aquatique

Etudiée à la fin du siècle dernier par MAGNIN et AUBERT, la végétation fixée du lac de Joux présente à l'heure actuelle les caractères suivants.

Les deux extrémités possèdent une végétation localement abondante, plus ou moins zonée (fig. 31), dont le développement est favorisé par la faible profondeur de la beine et par le déversement d'eaux d'égout chargées d'éléments fertilisants.

Cette végétation littorale est constituée notamment par des associations de *Phragmites communis* (Roseau commun), *Eleocharis palustris* (Héléocharis des marais), *Hippuris vulgaris* (Queue de cheval ou Pesse d'eau), *Polygonum amphibium* (Renouée aquatique), *Ranunculus flaccidus* (Renoncule lâche), et par toute une série de Potamots, parmi lesquels les *Potamogeton perfoliatus* (P. perfolié), *lucens* (P. luisant), *gramineus* (P. graminée) et *filiformis* (P. filiforme) – qui comme *Elodea canadensis* (Peste d'eau) et *Polygonum amphibium* prospèrent dans des eaux polluées – se rencontrent souvent en colonies nombreuses et denses. Les *Characées* tapissent des surfaces plus ou moins vastes de la beine.

En revanche, la végétation aquatique est pauvre sur de grandes étendues des deux bords, surtout le long de la rive rocheuse occidentale. Cependant, dans le voisinage des lieux habités, on observe une abondance particulière des hydrophytes constituant le fond de la flore lacustre.

La richesse des eaux en bicarbonate calcique explique l'intensité de l'incrustation calcaire à la surface, voire même dans l'épiderme de certaines espèces, telles que les Characées et les *Potamogeton perfoliatus* et *lucens*.

Caractérisée par une prolifération des Potamots et par l'apparition d'*Elodea canadensis*, cette espèce se rencontrant dans les eaux calmes, l'évolution depuis le début du siècle de la végétation littorale du lac de Joux, témoigne de l'eutrophisation du milieu. L'influence humaine apparaît nettement dans cette évolution.

XI. Considérations générales sur la pollution du lac de Joux

L'ensemble des données morphologiques, physiques, chimiques et biologiques recueillies au cours de cette étude fait envisager pour le lac de Joux un *type moyennement eutrophe*. Plus exactement, le stade actuel d'évolution du milieu correspond à un *degré bêta mésosaprobe de contamination*.

Rappelons ici que la *classification des Saprobies* due à KOLKWITZ et MARSSON, basée sur le fait que les associations faunistiques et floristiques de-

Figure 31
Carte schématique des zones de végétation.

meurent en étroite relation avec les caractéristiques physico-chimiques du milieu aquatique, différencie les eaux de surface en quatre classes ou, mieux, en quatre zones caractérisées par des conditions de milieu et, par conséquent, par des communautés d'organismes ou biocénoses différentes. Ces zones sont nommées selon l'intensité de la pollution: zone des oligosaprobies: eaux à peine ou non polluées; zone des mésosaprobies bêta: eaux moyennement polluées; zone des mésosaprobies alpha: eaux fortement polluées; zone des polysaprobies: eaux extraordinairement polluées.

Le système des Saprobies s'applique à toutes les eaux polluées par des matières organiques. Bien entendu, les limites fixées entre ces zones n'ont rien de rigide; suivant les cas, il convient de distinguer des classes ou zones intermédiaires.

LIEBMANN, de Munich, utilise un mode de représentation plus suggestif, différenciant les eaux de surface en quatre classes représentées par les couleurs suivantes: I (bleu): oligosaprobies; II (vert): mésosaprobies bêta; III (jaune): mésosaprobies alpha; IV (rouge): polysaprobies. Il distingue en outre des zones intermédiaires, hachurées en deux couleurs; par exemple: zone I–II = vert et bleu. Pour les lacs, la classe I correspond au type fondamental oligotrophe, les classes II–III à IV au type eutrophe.

Considérant l'ensemble des particularités biologiques et physico-chimiques du sol lacustre et de la couche d'eau qui lui est immédiatement sus-jacente, d'une épaisseur de 2 m environ, nous avons dressé pour le lac de Joux une carte schématique de l'état du fond (fig. 32), où nous avons figuré les différentes zones par des représentations conventionnelles. Cette carte a l'avantage de renseigner au premier coup d'œil sur le degré de pollution du lac. Les beines d'amont et d'aval, de même que la cuvette centrale, appartiennent à la zone des mésosaprobies bêta, classe II–III; la «fosse» à l'extrémité aval du lac, en raison de son état pollutif plus accusé, est un milieu alpha mésosaprobe, classe III. Cependant, le degré de contamination de la plus grande partie du fond, comme d'ailleurs de la masse des eaux, correspond à un type bêta mésosaprobe, classe II. Les limites fixées entre les divers secteurs envisagés n'ont rien d'absolu. En établissant la carte, nous avons tenu compte de la physionomie générale de ces étendues, sans nous laisser distraire par le caractère particulier de certaines modifications locales, et sans oublier que la pollution s'étend aussi à toute la rive occidentale.

Quelles sont les *causes de l'eutrophisation, de la pollution du lac de Joux?* Cette évolution procède de plusieurs effets:

a) une *maturation normale*, provoquée par les dépôts accumulés par les ans et qui, peu à peu, contribuent au vieillissement du lac;

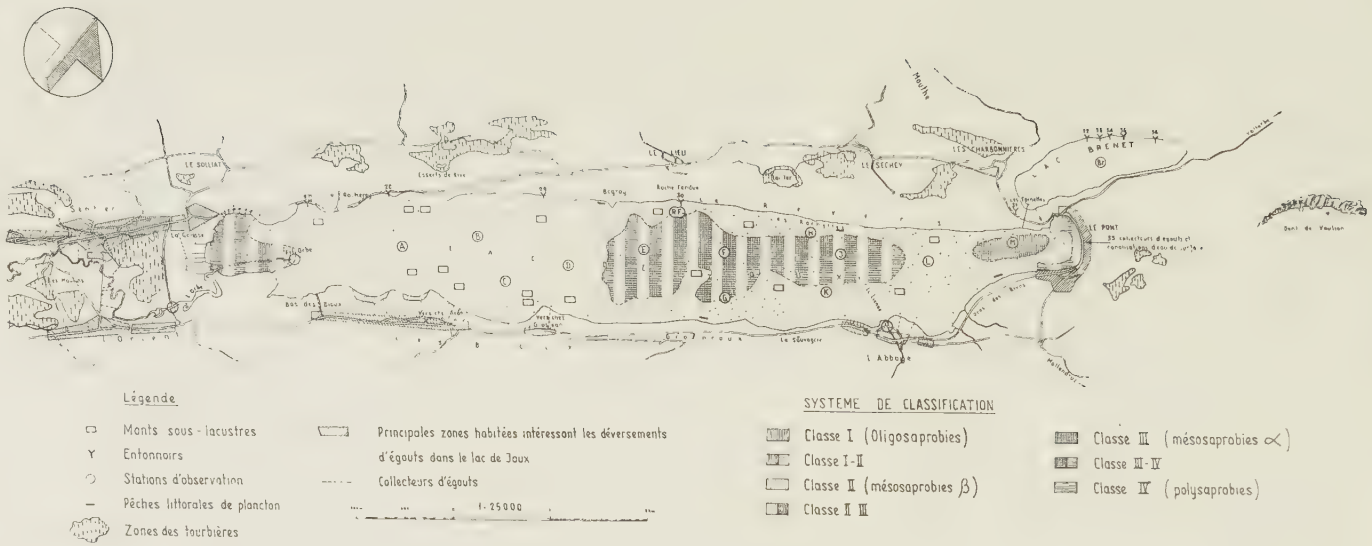


Figure 32
Classification qualitative du lac de Joux: Représentation schématique de l'état du fond selon la méthode munichoise (Recherches 1953–56).

b) une *pollution primaire*, due à des causes extérieures: déversement d'eaux d'égout brutes et autres résidus, d'eaux de ruissellement et de drainage entraînant des engrais, d'eaux de lessivage des tourbières, etc. Ces apports sont introduits dans le lac, soit directement, soit par l'intermédiaire de l'Orbe et de la Lionne;

c) une *pollution secondaire*, plus discrète, due à la décomposition du plancton et des plantes aquatiques, dont le développement est d'autant plus abondant que le milieu contient davantage d'éléments fertilisants (nitrates et phosphates tout spécialement). Ceux-ci provenant, d'une part de la dégradation et de la minéralisation des matières organiques produites ou introduites dans le lac, d'autre part du lessivage des terrains avoisinants, il est clair que tout apport supplémentaire d'engrais d'origine humaine contribue à aggraver la situation;

d) l'*exploitation du lac comme retenue hydro électrique*, qui influe sur le régime biochimique des eaux.

Dans cette eutrophisation à la fois naturelle et artificielle, la *principale cause* est sans aucun doute le *déversement croissant d'eaux usées des communes riveraines*. Aussi, la plus urgente des mesures d'assainissement à prendre est une épuration préalable de ces eaux. Nous avons montré que l'auto-épuration du lac ne parvient plus à faire face aux différentes sources de pollution. C'est dire que dans l'état actuel, une clarification par décantation est tout-à-fait insuffisante; l'assainissement à réaliser implique une *épuration générale, mécanique et biologique, des eaux usées*.

Deuxièmement, si l'on veut freiner efficacement l'eutrophisation du lac de Joux, il faut recourir à une *aération artificielle de l'hypolimnion*, puisque la pollution provoque en période de stagnation la disparition progressive de l'oxygène en profondeur et que les processus naturels d'aération sont insuffisants pour réapprovisionner à longue échéance les eaux profondes en oxygène. Cette aération sous-lacustre, par exemple selon le procédé appliqué au lac de Bret, pourrait aider le lac à rétablir son équilibre biochimique compromis par les conséquences de l'eutrophie.

Relevons enfin que le lac de Joux constitue, sans aucun doute, un point d'eau intéressant pour la *fourniture d'eau potable*, aux conditions suivantes: eau puisée à une profondeur minimum de 25 m, au-dessous des eaux moyennes du lac (cote 1003,80 m), puis filtrée et désinfectée. La zone la plus favorable pour l'établissement d'une prise d'eau se situe dans le secteur: Bégroy – Les Rochettes – Groinroux.

CONCLUSIONS

Etant donné le régime peu satisfaisant de l'oxygène, la pollution bactérienne des eaux, l'abondance et la composition du plancton, les caractères chimiques et faunistiques des sédiments de la zone profonde, enfin l'évolution symptomatique depuis le début du siècle de la végétation fixée, le lac de Joux doit être considéré comme sérieusement «menacé», alors même que l'aggravation des conditions biochimiques n'est que passagère. On ne saurait oublier que chaque période de stagnation contribue à aggraver la situation, en raison de la carence des processus d'auto-épuration.

Il est donc urgent de stopper la détérioration en cours et si possible de la faire rétrograder.

Nous voulons espérer que cette étude, malgré ses lacunes et ses imperfections, contribuera à la connaissance du lac de Joux et appellera l'attention des autorités tant sur son état déjà critique que sur les conséquences de la pollution.

BIBLIOGRAPHIE

[1] D. AUBERT, *Feuille «Vallée de Joux»*, N° 17, Atlas géologique de la Suisse 1:25000 (Francke, Berne 1941).

[2] D. AUBERT, *Monographie géologique de la Vallée de Joux (Jura vaudois)*, Matériaux pour la carte géologique de la Suisse, nouvelle série, 78e livraison (Francke, Berne 1943).

[3] D. AUBERT, *Les pertes du lac Brenet (Vallée de Joux)*, Bull. Soc. vaud. Sc. nat. *63*, N° 270, 453–462 (1948).

[4] S. AUBERT, *La flore de la Vallée de Joux – Etude monographique*, Thèse Fac. Sciences, Univ. Zurich, et Bull. Soc. vaud. Sc. nat. *36*, N° 138, 327–741 (1901).

[5] S. AUBERT, *La congélation du lac de Joux pendant l'hiver 1911–12*, Bull. Soc. vaud. Sc. nat. *48*, N° 176, 337–343 (1912).

[6] S. AUBERT, *Considérations sur le climat de la Vallée de Joux*, Bull. Soc. vaud. Sc. nat. 57, N° 230, 493–524 (1932).

[7] S. AUBERT, *Le gazonnement de la grève exondée du lac Brenet*, Bull. Soc. vaud. Sc. nat. 64, N° 271, 61–67 (1948).

[8] S. AUBERT, *La Vallée de Joux*, Trésors de Mon Pays, N° 36 (Le Griffon, Neuchâtel 1949).

[9] C. BECHERT, *Peuplement du haut cours de l'Orbe, du lac des Rousses au lac de Joux*, Pêcheur et Chasseur suisses, N° 10, 327–328 (1949).

[10] R. BESSON, *La Compagnie vaudoise des forces motrices des lacs de Joux et de l'Orbe – Histoire d'une entreprise au terme d'un demi-siècle d'activité, 1904–1954*, plaquette C.V.E. (Lausanne 1954).

[11] J. Calame et C. Paschoud, *Une amélioration du pouvoir d'accumulation des lacs de Joux et Brenet*, Bull. techn. Suisse romande, N° 1, 1–6 (1946).
[12] R. Chodat, *Etudes de biologie lacustre – Nouvelles remarques sur la flore pélagique superficielle des lacs suisses et français*, Bull. Herbier Boissier *6*, 49–77 et 155–188 (Genève 1898).
[13] R. Chodat, *Algues vertes de la Suisse*, Matériaux pour flore cryptogamique suisse *1*, fasc. 3, 91, 189–190, 199–200, 212–213, 217–218 (1902).
[14] G. du Plessis–Gouret, *Essai sur la faune profonde des lacs de la Suisse*, Mémoires Soc. helv. Sc. nat. *29*, 13–19, 21, 27–29, 32, 38–45 (1885).
[15] F. A. Forel, *La faune profonde des lacs suisses*, Mémoires Soc. helv. Sc. nat. *29*, 217–218 (1885).
[16] F. A. Forel, *Présentation de la carte hydrographique des lacs de Joux et Brenet*, Bull. Soc. vaud. Sc. nat. *28*, N° 106, IX–X (1892).
[17] F. A. Forel, *La congélation des lacs suisses et savoyards durant l'hiver 1891*, Arch. Sc. phys. et nat. *27*, 48–90 (1892).
[18] F. A. Forel et H. Golliez, *Expérience de coloration exécutée le 3 décembre 1892*, Bull. Soc. vaud. Sc. nat. *29*, N° 113, IV (1893).
[19] F. A. Forel et H. Golliez, *Expériences de coloration des eaux de l'Orbe*, Bull. Soc. vaud. Sc. nat. *30*, N° 114, XIV–XVI, XVII–XVIII et XXXVIII (1894).
[20] F. A. Forel, *Quelques études sur les lacs de Joux: la limnimétrie, les crues des lacs, l'entonnoir de Bon-Port, dates de la congélation des lacs, fentes et fendues de la glace des lacs*, Bull. Soc. vaud. Sc. nat. *33*, N° 124, 79–100 (1897).
[21] F. A. Forel et S. Aubert, *Expériences de coloration des eaux du Brassus (Vallée de Joux)*, Bull. Soc. vaud. Sc. nat. *34*, N° 127, XXXVIII et LIII (1898).
[22] F. A. Forel, *Flaques d'eau libre dans la glace des lacs*, Bull. Soc. vaud. Sc. nat. *34*, N° 129, 272–278 (1898).
[23] F. A. Forel, *Sur l'écoulement des eaux des lacs de Joux dans l'Orbe à Vallorbe*, Bull. Soc. vaud. Sc. nat. *36*, N° 131, VII–VIII (1899).
[24] F. A. Forel, *Sur l'origine des sources de l'Orbe*, Bull. Soc. neuch. Sc. nat. *27*, 282–283 (1899).
[25] F. A. Forel, *Les conditions actuelles de la source de l'Orbe à Vallorbe*, Bull. Soc. vaud. Sc. nat. *46*, N° 168, V-VI (1910).
[26] L. Gauthier, *Contribution à l'histoire naturelle de la Vallée de Joux (géographie, géologie, hydrographie, météorologie)*, J. Soc. vaud. d'utilité publique, 176–192 (1890).
[27] L. Gauthier, *Première contribution à l'histoire naturelle des lacs de la Vallée de Joux*, Bull. Soc. vaud. Sc. nat. *29*, N° 113, 294–296 (1893).
[28] C. Jacot–Guillarmod, *Carte des bassins fermés du Jura suisse*, 1:100000, Serv. topograph. fédéral (Berne 1909).
[29] C. Linder, *Expertise au lac de Joux, en vue de l'introduction de bondelles, août 1930* (recherches non publiées).
[30] A. Magnin, *Recherches sur la végétation des lacs du Jura*, Revue gén. botanique *5*, 241–257, 303–316 (Paris 1893).
[31] A. Magnin, *Contributions à la connaissance de la flore des lacs du Jura suisse*, Bull. Soc. botanique de France *41*, CVIII–CX et CXII–CXVIII (1894).
[32] A. Magnin, *Additions à la flore des lacs de Joux, Brenet et Ter*, Arch. Sc. phys. et nat. *2*, 606 (1896).

[33] A. MAGNIN, *La végétation des lacs du Jura – Les lacs du Jura: N° IV – Monographies botaniques de 74 lacs jurassiens, suivies de considérations générales sur la végétation lacustre*, 232–243, 253–256, 311, 322–323, 352–355 (Klincksieck, Paris 1904).

[34] M. MICHAUD, *Note sur le débit des exutoires invisibles du lac de Joux*, Bull. techn. Suisse romande, N° 21, 249–250 (1907).

[35] A. PALAZ, *Régularisation des eaux du lac de Joux et utilisation des forces motrices – Rapport présenté au Département des travaux publics du Canton de Vaud* (Valloton et Guex, Lausanne 1899).

[36] C. PERRIN, *Les installations de la Compagnie vaudoise des forces motrices des lacs de Joux et de l'Orbe*, Bull. techn. Suisse romande, N° 18, 329–337, N° 19, 345–348 (1904).

[37] J. PICCARD, *Expériences faites aux entonnoirs de Bonport (Vallée de Joux)*, Actes Soc. helv. Sc. nat. 76e session, 36–38 (1893).

[38] E. PITARD, *Pêches pélagiques faites dans les lacs du Jura situés sur le cours de l'Orbe*, Actes Soc. helv. Sc. nat., 79e session, 146–147 (1896).

[39] E. PITARD, *Sur le plancton des lacs du Jura*, Arch. Sc. phys. et nat. *2*, 612–615 (1896).

[40] E. PITARD, *Sur le plancton du lac de Joux et du lac Brenet*, Arch. Sc. phys. et nat. *3*, 79–83 (1897).

[41] H. UTTINGER, *Les précipitations en Suisse de 1901 à 1940*, Ass. suisse aménagement des eaux (Zurich 1949).

[42] F. ZSCHOKKE, *Die Tierwelt der Juraseen*, Rev. suisse Zool. *2*, 349–376 (1894).